



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

MODERNÍ TERMICKÉ ÚPRAVY BIOMASY

THERMAL BIOMASS TREATMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Křepela

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Petr Křepela**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Moderní termické úpravy biomasy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Přestože je biomasa v poslední době velmi využívané palivo, existuje další potenciál pro její využití. Vedle klasického spalování tuhých paliv existuje řada termochemických metod, které biomasu jako palivo zušlechťují. Práce se bude v teoretické rovině věnovat metodám pomalé i rychlé pyrolýzy, zplyňování, torefikaci a hydrotermálnímu krakování. Budou popsány základní principy metod a posouzeny výstupy jednotlivých technologií a jejich využití.

Cíle bakalářské práce:

Vytvoření přehledu technologií transformace biomasy.
Popis vybraných technologií.
Posouzení výstupů z technologií a porovnání účinností.

Seznam doporučené literatury:

QUASCHNING, Volker. Obnovitelné zdroje energií. Praha: Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-2-7-3250-3.

KLASS, Donald L. Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals. San Diego: Academic Press, c1998. ISBN 01-241-0950-0.

TRÁVNÍČEK, Petr. Technologie zpracování biomasy za účelem energetického využití. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2015. ISBN 978-80-7509-206-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Cílem této práce je vytvoření přehledu metod zušlechťování biomasy, popis výsledných produktů a jejich praktické využití. Dále popis technologií, které se pro jednotlivé metody využívají a porovnání účinností. K dosažení těchto cílů je nutné provést rešerši odborné literatury a vypracovat ucelený soubor smysluplných informací, které budou srozumitelné pro každého čtenáře, ale neurazí ani odbornou veřejnost.

Klíčová slova

Biomasa, pyrolýza, karbonizace, zplyňování, pražení, hydrotermální krakování

Abstract

The aim of this work is to provide an overview of biomass processing methods, description of final products and their practical application. Furthermore, a description of the technologies used for each method and the comparison of the efficiency. To achieve these goals, it is necessary to carry out a literature search and to produce a comprehensive set of meaningful information that is comprehensible to every reader, but does not hurt the professional public.

Key words

Biomass, pyrolyse, carbonization, gasification, torrefaction, hydrothermal cracking

Bibliografická citace mé práce:

KŘEPELA, P. *Moderní termické úpravy biomasy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 56 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marek Baláš, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Moderní termické úpravy biomasy** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který je uveden na konci této práce.

V Brně dne 23. 5. 2017

.....
Petr Křepela

Poděkování

Na tomto místě chci poděkovat rodině a všem přátelům, za podporu při mém studiu na FSI VUT. Nesmím také zapomenout poděkovat všem vědcům z celého světa, kteří se věnují výzkumu energetického využití biomasy, za jejich přínosnou a užitečnou práci. Bez jejich snahy by tato práce vnikala jen stěží.

OBSAH

ÚVOD	11
1. BIOMASA A ENERGIE Z BIOMASY	12
1.1.1 Biomasa pěstovaná pro energetické účely	12
1.1.2 Odpadní biomasa	15
1.2 Získávání energie z biomasy	15
1.2.1 Suché procesy (termochemické procesy)	15
1.2.3 Fyzikálně – chemické procesy	16
1.3 Výhody a nevýhody energie z biomasy	16
2. PYROLÝZA	18
2.1 Bio-olej	20
2.1.1 Využití pyrolýzního oleje	20
2.1.2 Výhody Bio-oleje	22
2.2 Dřevěné uhlí	23
2.2.1 Využití dřevěného uhlí	24
2.3 Technologie rychlé pyrolýzy	25
2.4 Technologie pomalé pyrolýzy	27
2.5 Zhodnocení pyrolýzy	28
3. PRAŽENÍ - TOREFAKCE	29
3.1 Torefikované pelety a brikety	30
3.1.1 Využití torefikovaných pelet a briket	30
3.1.2 Výhody torefikovaných pelet	31
3.2 Technologie pro pražení biomasy	32
3.3 Zhodnocení pražení	35
5. ZPLYŇOVÁNÍ BIOMASY	36
5.1 Syntézní plyn	37
5.1.1 Čištění syntézního plynu	37
5.1.2 Využití syntézního plynu	38
5.2 Technologie pro zplyňování biomasy	40
5.2.1 Zplyňovací reaktory s pevným ložem	40
5.2.2 Reaktory s fluidním ložem	42
5.4.3 Hořákové generátory	43
5.2.3 Plazmové zplyňování	44

5.3	Zhodnocení zplyňování	46
6.	HYDROTERMÁLNÍ KRAKOVÁNÍ (ZKAPALŇOVÁNÍ)	47
6.1	Bio-ropa	49
6.1.1	Úprava bio-ropy	50
6.2	Zbytková voda	50
6.3	Zhodnocení procesu HTL	50
ZÁVĚR.....		51
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		52
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A JEDNOTEK		55

ÚVOD

Existuje mnoho různých druhů zdrojů energie. V současné době jsou nejvíce využívány fosilní zdroje, jako je uhlí, ropa, nebo zemní plyn. Nicméně tyto zdroje pomalu ale jistě začínají na planetě docházet. Proto se hledají alternativy, jak co nejefektivněji využít zdroje obnovitelné. Mezi obnovitelné zdroje patří energie slunečního záření, větrná, vodní energie a konečně energie biomasy.

Biomasa je nejstarším zdrojem energie, který lidstvo využívá již od nepaměti. Spalování surové biomasy v domácnostech je stále velmi rozšířený způsob jak vyrobit teplo v chladných zimních obdobích. Dnes je na biomasu, stejně jako na ostatní obnovitelné zdroje, kladen velký důraz a to nejen kvůli jejich obnovitelnosti a docházejícím fosilním zdrojům ale i kvůli tomu, že tyto zdroje jsou šetrné k životnímu prostředí, tedy, na rozdíl od fosilních zdrojů, ekologické. Existuje mnoho metod, jak biomasu jako palivo zušlechtit, těmto metodám je věnována tato práce, kde jsou popsány principy jednotlivých metod, výstupní produkty a jejich využití a také příklady technologií, které se pro zpracování používají.

1. BIOMASA A ENERGIE Z BIOMASY

Vedle sluneční, větrné, vodní a solární energie se biomasa řadí k obnovitelným zdrojům energie. Biomasou rozumíme veškerou mrtvou i živou organickou hmotu - rostlinnou i živočišnou. Rostlinná biomasa ve formě uhlovodíků vzniká fotosyntézou, energii k této přeměně dodává slunce. Živočišná biomasa vzniká za přispění té rostlinné – spásání trávy, listů atd. a jejich přeměna živočišný materiál. Kromě slunce je pro biomasu důležitá také voda, proto je množství biomasy na planetě Zemi rozmístěno nerovnoměrně. Rozlišuje se biomasa cíleně pěstovaná pro energetické účely a odpadní.

1.1.1 Biomasa pěstovaná pro energetické účely

Cíleně pěstovaná biomasa se primárně využívá pro energetické účely. Jedná se o energetické plodiny, mezi které patří ligno-celulózové (dřeviny, obiloviny, travní porosty), olejnaté (řepka olejka, slunečnice, len) a škrobo-cukernaté rostliny (brambory, kukuřice, cukrová řepa). Biomasa z rychle rostoucích dřevin se spaluje ve formě polen, briket nebo pelet, nebo z ní lze vyrábět alternativní paliva. Cíleně pěstovanou biomasu kromě výroby pohonných hmot a tepelné energie použít také k výrobě elektřiny.

Ligno-celulózové rostliny

- Rychle rostoucí dřeviny

Přednostmi rychle rostoucích dřevin a bylin je snadný výsev, rychlý růst a odolnost vůči škůdcům. Dřevo se může těžit již po dvou letech, ale v závislosti na způsobu jeho dalšího zpracování doba jeho růstu nepřekračuje 8 let. Důležité pro pěstování jsou klimatické podmínky, energetické dřeviny potřebují vegetační období dlouhé více než 150 dní a dostatečné množství srážek. Energetické dřeviny lze pěstovat nevyužívané zemědělské půdě nebo i kolem dálnic. Mezi rychle rostoucí dřeviny patří topoly (ilustrační obrázek 1.1 topolové plantáže), vrby, olše, akáty nebo lísky. Pěstují se na půdách, které nejsou zemědělsky využívány. Biomasa z rychle rostoucích dřevin se spaluje, ve formě polen, briket nebo pelet.



Obrázek 1.1 Topolová plantáž [26]

- Rostliny bylinného charakteru

Mezi energeticky využívané byliny patří např. konopí, amarantus, šťovík či kostřava. Z travních porostů se využívá tzv. sloní tráva nebo chrastice.

Olejnate rostliny

Tyto rostliny se používají pro výrobu surových olejů, patří sem řepka olejka, slunečnice, len apod. Nejrozšířenější je řepka olejná, z řepkového oleje se vyrábí bio-paliva a ze slámy pelety. Olejnaté rostliny jsou základem pro výrobu ekologických kapalných bio-paliv – bionaft. Bionaftu je možné v různé míře použít v dieslových motorech. Dnes jsou tato bio-paliva nutná, kvůli nařízení Evropské unie, součástí tradičních pohonných hmot.

Bionafta z řepky (ilustrační obrázek řepky olejky 1.2) se vyrábí transesterifikací nenasycených mastných kyselin, které rostlina obsahuje. Methylester řepkového oleje může být používán jako čisté bio-palivo, do kterého se nemusí přidávat žádné příměsi. Bionafta při spalování lépe hoří, má vysokou mazací schopnost, méně kouří a má takřka nulový obsah oxidů síry ve výfukových plynech. Nevýhodou pěstování řepky je, že při něm vzniká více skleníkových plynů, než při spalování z ní vyrobené bio-nafty, důvodem je používání dusíkatých hnojiv. Při spalování řepkové bio-nafty vzniká až 6× méně skleníkových plynů než při spalování nafty vyrobené z ropy. Z řepky se vyrábí i pelety, které mají vyšší výhřevnost – až 16 MJ/kg. [21]



Obrázek 1.2 Řepka olejka [27]

Škrobo-cukernaté rostliny

Mezi tyto rostliny patří kukuřice, brambory, obiloviny nebo cukrová řepa, jejich rozkladem vzniká bioplyn, jehož složkou je metan, což je hořlavý plyn s výhřevností od 20 do 25 MJm⁻³. Nejběžněji se pro výrobu bioplynu používá kukuřice. Bioplyn se používá pro výrobu tepelné a elektrické energie, ale lze ho použít i jako pohonnou látku.

Aby bylo pěstování energetických rostlin co nejvíce efektivní, musí se na určitých místech pěstovat rostliny, které se do daného prostředí hodí a prospívají v něm. Energetické plodiny mají mnoho výhod. Mezi největší patří skutečnost, že jsou obnovitelnými zdroji energie a jsou šetrné k životnímu prostředí. Při pěstování energetických rostlin se nepotřebná zemědělská půda, místo aby ležela ladem, smysluplně využívá. Nevýhodou jsou vysoké investiční náklady na založení plantáží a vysoká vlhkost biomasy při sklizni.

Následující tabulka 1.1 obsahuje vlastnosti běžné biomasé, konkrétně různých druhů dřevní, tedy ligno-celulóзовé biomasy, dřevní štěpky a odpadů ze zemědělství.

Tabulka 1.1 **Vlastnosti biomasy [16]**

Druh paliva	Obsah vody [%]	Výhřevnost [MJ/kg]
borovice	20	18,4
vrba	20	16,9
olše	20	16,7
habr	20	16,7
akát	20	16,3
dub	20	15,9
jedle	20	15,9
jasan	20	15,7
buk	20	15,5
smrk	20	15,3
bříza	20	15,0
modřín	20	15,0
topol	20	12,9
dřevní štěpka	30	12,18
sláma obilovin	10	15,49
sláma kukuřice	10	15,40
lněné stonky	10	16,90
sláma řepky	10	16,00

1.1.2 Odpadní biomasa

Pod pojmem odpadní biomasa si lze představit zbytky ze zemědělské či lesnické produkce, ale i biologicky rozložitelnou část komunálního a průmyslového odpadu. Na rozdíl od cíleně pěstované biomasy nejsou rostliny v první řadě pěstovány pro energetické účely, ale nepotřebné zbytky (odpad) se dají energeticky využít.

Odpadní biomasa ze zemědělské výroby

Zemědělská výroba je hlavním producentem odpadní biomasy. Z rostlinné výroby se využívá přebytečné seno, sláma (obilná, řepková, kukuřičná), odpady z vinic a sadů nebo křoviny z mezí apod. Z živočišné výroby to jsou exkrementy hospodářských zvířat, hnůj, močůvka, kejda.

Odpadní biomasa z lesohospodářství

Co se týče lesnického odpadu, ten tvoří především zbytky z těžby, jako jsou větve, vršky stromů, kůra, odřezky, piliny, hobliny, pařezy a kořeny.

Biologicky rozložitelný komunální a průmyslový odpad

Do této kategorie patří odpad produkovaný každým z nás - zbytky potravin, papírové obaly apod. Mezi průmyslový odpad patří hlavně odpady z potravinářského průmyslu - z jatek, cukrovarů mlýnů, moštáren, mlékáren, lihovarů nebo splašky z kanalizace.

1.2 Získávání energie z biomasy

I když je teoreticky možné energeticky využít jakoukoliv biomasu, nejvyužívanější je rostlinná biomasa, ve které je uložena energie slunečního záření. Rostliny využívají slunečního záření k fotosyntéze, při níž vznikají pomocí vody a oxidu uhličitého, cukry, které obsahují velké množství energie.

1.2.1 Suché procesy (termochemické procesy)

Termickým procesům úpravy biomasy je věnována tato práce, budou tedy co nejpodrobněji rozebrány v následujících kapitolách. Mezi termické úpravy biomasy se zahrnuje pomalá pyrolýza (karbonizace), rychlá pyrolýza, pražení (torrefakce), zplyňování, hydrotermální krakování (zkapalňování) a také spalování.

Spalování biomasy

Spalování, využívané od pradávna, je nejstarší metodou získávání energie z biomasy. Spalování je termochemický proces, při kterém dochází k rozkladu biomasy na hořlavé plyny a další látky za přítomnosti vzduchu. Dochází k oxidaci, při níž vzniká oxid uhličitý, voda a teplo. Množství tepla získaného z biomasy závisí na výhřevnosti paliva. I v dnešní době je spalování biomasy stále velmi rozšířeným způsobem, jak vyrobit teplo v domácnostech. Spaluje se palivové dřevo ve formě palem, nebo štěpk, lisováním dřevěných pilin a drtin se vyrábí brikety a pelety, ty ale nemusí být vyrobené jen ze dřevní biomasy ale i z rostlin, např. ze slámy. Pro výrobu produktů ke spalování lze použít velké množství zdrojů, jako jsou např. konopí seté, laskavec, sléz přeslenitý, čičorka pestrá atd. nebo také rychle rostoucí dřeviny – topoly, vrby, olše apod. [20]

1.2.2 Biochemické procesy

Mezi tyto přeměny patří alkoholové kvašení, metanové kvašení a esterifikace surových olejů.

Alkoholové kvašení

Produktem alkoholového kvašení je etanol, který se využívá jako ekologické palivo pro spalovací motory. Pro kvašení se používají rostliny obsahující cukr a škrob a následně se destilují. Produktem destilace je pak zmíněný etanol. [20]

Metanové kvašení

Výsledným produktem metanového kvašení je bioplyn, což je směs plynů, tvořená 50 – 75 % metanu, 25 – 40 % oxidu uhličitého a dalšími plyny. Touto metodou se zpracovávají odpadní vody, zvířecí exkrementy apod. Kvašení probíhá za nepřístupu vzduchu. [20]

1.2.3 Fyzikálně – chemické procesy

Esterifikace surových olejů

Produktem je metylester, jenž se svými vlastnostmi a výhřevností velice podobá motorové naftě. Metylester vzniká z vylisovaného oleje z olejnatých rostlin substitucí metylalkoholu za glycerin. [20]

1.3 Výhody a nevýhody energie z biomasy

Biomasa má jako zdroj energie mnoho výhod, ale ani biomasa není dokonalá a má poměrně dost nevýhod, v následujícím článku jsou popsány některé z nich.

Výhody energie z biomasy

- **Biomasa je obnovitelným zdrojem energie** - Biomasa se považuje za obnovitelnou energii, protože organické materiály, které ji tvoří, jsou prakticky nevyčerpatelné. Všechny druhy biomasy, jako dřevo, komunální odpady, kaly z čistíren odpadních vod jsou neustále produkovány lidskou společností.

- **Biomasa je uhlíkově neutrální** - Uvolňování velkého množství uhlíku (ve formě oxidu uhličitého) zapříčiňuje klimatické změny. Energie z biomasy je, na rozdíl od spalování fosilních zdrojů, přirozenou součástí uhlíkového cyklu. Biomasa uvolní do atmosféry pouze takové množství uhlíku, jaké během svého života absorbuje.

- **Zdroje biomasy jsou všude dostupné** - I když se s biomasou, kterou můžeme energeticky využít, setkáváme prakticky na každém kroku, je třeba k jejímu využívání přistupovat zodpovědně a plánovat její obnovování.

- **Energetické využití biomasy omezuje závislost na fosilních zdrojích** – Vhodná úprava (viz tato práce) biomasy může posloužit jako alternativní zdroj fosilních paliv v elektrárnách.

- **Energetické využití biomasy napomáhá redukcí odpadů na skládkách** - Jelikož i komunální odpad tvoří podstatná část biomasy, může být energeticky využit.

- **Z biomasy se dá vyrobit velké množství různých produktů** - Z biomasy mohou být vyrobeny prakticky setné nebo podobné produkty jako z fosilních zdrojů. [6]

Nevýhody energie z biomasy

- **Energie z biomasy není zcela čistá** – při použití lidského a živočišného odpadu k výrobě paliv se uvolňuje při jejich spalování metan., což je také skleníkový plyn a přispívá k ničení ozónové vrstvy, proto použití těchto materiálů není zrovnávající.

- **Využívání biomasy s sebou unese riziko odlesňování** - I s biomasou musíme zacházet opatrně, jelikž je nejvce používaná dřevní biomasa, musí být produkována udržitelným způsobem, aby nedošlo k odlesňování. Toto by mělo negativní vliv na zvířata žijící v lesích.

- **Biomasa vyžaduje velké množství vody** - Biomasa potřebuje vodu ke svému růstu a životu, v místech, kde není dostatek vody, se biomasa nevyskytuje vůbec, nebo jen v omezené míře. Problém by také byl, kdyby vody začalo ubývat, nebo byla extrémní sucha. Při nedostatecích vody by musely být vybudované zavlažovací systémy, což ale může způsobit nedostatek vody pro olně žijící zvířata i pro lidskou společnost.

- **Energie z biomasy je v porovnání s fosilními palivy neefektivní** - Pokud jde o účinnost, biomasa nedosahuje účinnosti fosilních paliv. [6]

2. PYROLÝZA

Pyrolýza termický proces probíhající za nepřístupu vzduchu. Výsledkem je pyrolýzní plyn, pyrolýzní kapalina a pevný zbytek resp. pyrolýzní koks či dřevěné uhlí. Vlivem tepla se při pyrolýze štěpí vazby v organických molekulách za vzniku menších molekul. Tento proces spočívá v ohřevu biomasy v reaktoru nad mez termické nestability, při které začíná probíhat štěpení (300 – 500 °C). Dle dosahovaných teplot se pyrolýza dělí na nízkoteplotní (do 500 °C), středněteplotní (500 až 800°C) a vysokoteplotní (nad 800°C). Dále se pyrolýza, dle rychlosti ohřevu částic, dělí na pyrolýzu rychlou a pomalou.

Rychlá pyrolýza

Rychlá pyrolýza je jeden z nejmodernějších a nejnovějších procesů pro přeměnu biomasy na produkty s vyšší energetickou hustotou. Důležitý je extrémně rychlý ohřev vstupní suroviny rychlostí 500 až 1000 °C za minutu. Hlavním produktem rychlé pyrolýzy je kapalný bio-olej, jehož výtěžky jsou 60-75 hm. %. U sekundárních produktů jsou výtěžky menší – pevný zbytek 15-25 hm. % a pyrolýzní plyn 10-20 hm. %. Rychlost ohřevu musí být stejná v celém objemu zpracovávané biomasy, to je podmíněno malou velikostí pyrolyzovaných částic, proto je nutné, aby vstupní surovina byla jemně namleta. Přívod tepla je možný různými způsoby – přídavným spalováním, recirkulací horkého písku či horkými stěnami reaktoru. Pro vysoké výtěžky bio-oleje je také důležité, aby doba zdržení vznikající páry a aerosolů v reaktoru nebyla delší než 2 sekundy. Pokud by zůstaly v reaktoru déle, podlehly by nežádoucím sekundárním reakcím, proto musí být zajištěno jejich co nejrychlejší ochlazení. Také je nezbytné omezení obsahu vody ve vstupní surovině, kde by neměl přesahovat 10% (výjimečně 15%). Vlhkost v biomase se dá zredukovat předsušením v sušárnách. Tímto krokem dojde ke snížení obsahu vody ve výsledném produktu – bio-oleji. Plyn, který se nevyužil pro výrobu oleje, je vhodné spalovat a tím dodávat část tepla potřebného pro uskutečnění pyrolýzách reakcí. Pyrolýza je proces, který je šetrný pro životní prostředí. Pro rychlou pyrolýzu je možné použít jakoukoliv biomasu.

Děje probíhající při rychlé pyrolýze lze pro jednoduchost rozdělit do třech fází - sušení biomasy, karbonizace a tvorba plynu: [22]

- V intervalu do 200°C probíhá **sušení biomasy**, dochází k odštěpení vázané vody a tím pádem ke vzniku vodní páry, tyto procesy jsou endotermické.

- Tzv. **suchá destilace (karbonizace)** probíhá mezi teplotami 200 až 500°C, při které dochází k přeměně makromolekulárních struktur na plynné a kapalné produkty a pevný uhlík.

- Ve **Fázi tvorby plynu**, která nastává mezi 500 až do 1200°C, jsou vzniklé produkty dále štěpené. Z pevného uhlíku i z organických kapalných látek vznikají stabilní plyny - H_2 , CO, CO_2 , CH_4 . Vlivem teplot přesahujících 300 °C se z výchozího materiálu uvolňují, ve formě plynu, prchavé hořlavé látky, poté zbude pyrolýzní koks (dřevěné uhlí resp. pevný zbytek), který obsahuje uhlík a popeloviny. Procentuální podíl jednotlivých složek je dán průběhem pyrolýzy.

Pomocí rychlé pyrolýzy se dá zpracovat celé množství různých materiálů - kaly z čistíren odpadních vod, biologicky rozložitelný komunální odpad nebo samozřejmě dřevo ale i pneumatiky, plasty a některé druhy nebezpečných odpadů. Způsob zpracování závisí na druhu, resp. chemickém složení, použitého materiálu. Dalším důležitým faktorem ovlivňující způsob zpracování je sourodost/nesourodost použitého materiálu. Sourodé materiály, jako jsou pneumatiky, nebo biomasa jednoho druhu jsou pro pyrolýzu výhodnější, protože jsou známy vlastnosti materiálu a je proto snadnější předvídat, jak se materiál během zpracování bude chovat a tak samotný proces řídit. Komunální odpad nebo čistírenské kaly jsou nehomogenní suroviny a nemají přesně dané chemické složení, čímž je ovlivněna kvalita výstupních produktů. [1]

Pomalá pyrolýza (karbonizace)

Pomalá pyrolýza, jinak označovaná jako karbonizace, je nejstarší metodou energetického zušlechťování biomasy. Proces spočívá v pomalé rychlosti ohřevu, která je 5 – 7 °C za minutu. Teplota pyrolýzy musí přesahovat minimálně 400 °C, nejvyšší dosahovaná teplota je obvykle 600 °C a tlak, při němž reakce probíhá, se pohybuje mezi 0,001 - 0,1 MPa. Vlivem ohřevu za nepřístupu vzduchu dochází k unikání plynných a těkavých kapalných produktů. Nakonec zbude jen uhlík, který nepodléhá dalšímu rozkladu, tento produkt se označuje jako dřevěné uhlí a je hlavním produktem karbonizace.

Průběh karbonizace dřeva je rozdělen na 4 teplotní intervaly, které ale nejsou přesně ohraničeny (závisí na vlastnostech dřeva a provozních podmínkách), řízená pyrolýza probíhá obvykle do teploty až 450°C, kdy je obsah hlíku v dřevěném uhlí cca 80%: [5]

120-150°C

- probíhá vysychání dřeva (uvolňuje se vodní pára), chemický rozklad je prakticky zanedbatelný
- proces je endotermický

150-275°C

- dřevo tmavne, snižuje se jeho pevnost,
- začínají jeho první chemické změny, uvolňují se plyny (hlavně CO₂ a CO) a organické kyseliny (hlavně kyselina octová)
- proces je endotermický

275-380 (450°C)

- nastává bouřlivý exotermický rozklad dřeva a uvolňuje se hlavní podíl kondenzovatelných zplodin
- proces je exotermický

380-500 (450 - 550°C)

- při nižších teplotách je rozklad dřeva téměř ukončen a "dobíhá" exotermická reakce.
- při vyšších teplotách se produkty pyrolýzy dále štěpí a tepelnou energii je třeba dodat zvenčí

V dnešní době je kladen důraz na účelné zpracování odpadu. I když je pro pomalou pyrolýzu nejvhodnější dřevo (ve formě polen), můžeme zpracovat i lesní odpad, odpady ze zemědělství (sláma, odpady z cukrové třtiny, kukuřičné zbytky), dále odpady ze zpracování průmyslových plodin (olejiny, konopí, len). [5]

Produkty pyrolýzy, jak rychlé tak i pomalé, jsou pyrolýzní plyn, pyrolýzní koks, pyrolýzní olej a také spaliny. Pyrolýzní plyn se většinou používá jako palivo, které dodává teplo procesům při rychlé pyrolýze.

2.1 Bio-olej

Tzv. bio-olej je vedle plynu a pevného zbytku primárním produktem rychlé pyrolýzy. Bio-olej je tmavě hnědá kapalina s charakteristickým zápachem o hustotě 1,2 kg/dm³ a výhřevnosti 16–19 kJ/kg. Jedná se o komplexní směs organických sloučenin (obsahuje vodu, deriváty kyslíkatých organických sloučenin, deriváty dusíkatých sloučenin), složení se výrazně liší od složení paliv vyrobených z ropy, což je dáno tím, že biomasa, na rozdíl od fosilních paliv má velký obsah kyslíku. Složení je navíc ovlivněno složením vstupní suroviny, ale i technologií zpracování. Viskozita oleje se liší v závislosti na obsahu vody a typu vstupní biomasy. S vyšším obsahem vody viskozita oleje klesá, tím se usnadňuje jeho čerpání a přeprava. Voda také zvyšuje stabilitu oleje a současně snižuje teplotu spalování, čímž dochází ke snížení emisí oxidů dusíku během spalování oleje. Pokud bio-olej obsahuje více než 25 %



Obrázek 2.1 Bio – olej [31]

vody, má sklony k fázové separaci. Tomuto jevu se dá zabránit promícháváním nebo snížením obsahu vody. Pokud je olej vyroben pyrolýzou dřevní biomasy, pak k fázové separaci nedochází. Velkou výhodou pyrolýzního oleje je jeho snadná přeprava a skladovatelnost.

Tabulka 2.1 Výtěžnost jednotlivých produktů a výhřevnost bio – oleje při zpracování různých druhů biomasy

	dřevo	kůra	výlisky	papír
bio – olej [hm .%]	71 – 80	60 – 67	75 – 81	71 – 93
koks [hm .%]	12 – 20	16 – 28	12 – 14	4 – 20
plyn [hm .%]	5 – 12	8 – 17	5 – 10	2 – 12
výhřevnost [MJ/kg]	15,8 – 19,5	18,1 – 20,7	17,9 – 19,5	15,6 – 18,6

2.1.1 Využití pyrolýzního oleje

Škála využití pyrolýzního oleje je poměrně široká. Nejběžnější je využití v kogeneraci tj. kombinované výrobě elektrické energie a tepla v různých zařízeních, dále je možné, po úpravách konstrukce motoru, olej spalovat v dieslových motorech. Využití nalézá i v chemickém průmyslu a při výrobě alternativních paliv.

Výroba tepla a elektrické energie

Pyrolýzní olej může být jako náhrada fosilních paliv spoluspalován s topným olejem, uhlím nebo zemním plynem v kotlích, pecích nebo plynových turbínách pro kombinovanou výrobu elektrické energie a tepla. Využití pyrolýzního oleje nabízí jedinečnou příležitost ke zvýšení udržitelnosti dodávek energie a snížit závislost na fosilních palivech. Přímé spalování v kotlích nebo pecích je nejjednodušším způsobem, jak využít pyrolýzní olej. Existuje mnoho zařízení pro spoluspalování pyrolýzního oleje a dalších paliv (zemní plyn, topné oleje) ale i zařízení určené pro spalování samotného pyrolýzního oleje. Tyto aplikace umožňují se, alespoň částečně, odpoutat od docházejících fosilních zdrojů. Pyrolýzní olej, co se týče ceny, může být srovnáván s topnými oleji, ale je podstatně dražší než zemní plyn. Zajímavé je využití v dálkovém vytápění nebo ve velkých průmyslových společnostech, které si spalováním pyrolýzního oleje vyrábí vlastní elektřinu. Výhodou je, že při spalování pyrolýzního oleje nevznikají téměř žádné emise. [7]

Spalování v dieslových motorech

V některých částech světa se stále pro výrobu tepla a elektřiny používají diesellové motory. V oblastech, kde je k dispozici dostatečné množství biomasy může být olej vyráběn přímo na místě a tam také spalován. Komerčně atraktivní je použití pyrolýzního oleje pro lodní pohony, kde je pyrolýzní olej jednou z mála alternativ k fosilním palivům. Použití bio-oleje bylo úspěšně testováno na stacionárních dieslových motorech. Nicméně jsou nutné určité úpravy motoru, aby nedošlo k jeho poškození nebo k poškození palivového systému, důvodem je obsah vody a kyselost oleje. Elektrická účinnost činí u vznětových motorů asi 40%, což je ve srovnání s ostatními alternativními zdroji (plynové turbíny, přímé spalování) relativně vysoké číslo. V příštích letech se očekává výzkum a uvedení na trh dieslových motorů, které budou schopné pracovat na pyrolýzní olej. Tyto motory se budou využívat v lodní dopravě a v kogeneračních jednotkách. Výrobní cena pyrolýzního oleje je srovnatelná s náklady na výrobu nafty, proto je pyrolýza velmi atraktivní alternativou pro výrobu paliva v uvedených odvětvích. [7]

Výroba pohonných hmot

Biopaliva vyrobená z pyrolýzního oleje se nazývají biopalivy 2. generace a mohou být získána přímým zdokonalením, běžným rafinováním v existujících ropných rafinériích nebo pomocí syntézního plynu a následnými procesy syntézy – Fischer-Tropsova syntéza. V procesu výroby biopaliv 2. generace dochází ke smíchání fosilní ropy a bio-oleje, laboratorní výzkumy prokázaly, že směs může obsahovat až 20% pyrolýzního oleje, je ale možné benzín a naftu vyrábět přímo z pyrolýzního oleje. Tato problematika je stále ve fázi výzkumů a mnoho vědců na celém světě se snaží, aby byla výroba biopaliv z biomasy co nejefektivnější a využitelná v průmyslovém měřítku. [8]

Využití v chemickém průmyslu

Využití v chemickém průmyslu je dalším z bedlivě sledovaných a zkoumaných odvětví, kde je možné využít pyrolýzní olej. Z pyrolýzního oleje je možné vyrábět prakticky totožné produkty jako z fosilní ropy s využitím standartních rafinérských podmínek. Důležité je rozdělení oleje na různé frakce s odlišnými vlastnostmi. Jednotlivé frakce se pak používají pro výrobu konkrétních chemikálií nebo pohonných hmot. Cílem je využít co největší množství bio-oleje. Výhodou tohoto způsobu je, že může být použit prakticky všude, kde je dostatečné množství biomasy (např. státy bez přístupu k ropě) tímto dojde k ušetření za dopravu do petrochemických závodů, minerály obsažené

v biomase zůstávají v zemi původu a dojde ke spolupráci mezi zemědělstvím a petrochemickým průmyslem. Pyrolýzní olej se skládá z následujících frakcí - Pyrolytický lignin (z ligninu), pyrolytické cukry (z celulózy) a vodná fáze obsahující menší organické složky, např. Kyselina octová (převážně z hemicelulózy), které pocházejí z v závorce uvedených stavebních částí biomasy. Pyrolitický lignin může sloužit k výrobě formaldehydových pryskyřic, které se používají v dřevěných výrobcích (dřevotřískové desky, překližka atd.). Další aplikací je náhrada fosilního asfaltu nebo k výrobě různých povlaků a konzervačních látek. Pyrolitické cukry mohou sloužit např. k výrobě bioethanolu. Ze třetí frakce mohou být jednoduchými procesy vyráběny čistící prostředky atd. [7]

2.1.2 Výhody Bio-oleje

I když je biomasa, potažmo pyrolýza biomasy, zdrojem energie s obrovským potenciálem, neměli bychom ho opouštět. Ačkoliv je biomasa bohatě dostupná, má několik nevýhod, které omezují její použití. Nevýhodou je dostatek biomasy v řídké osídlených oblastech, kde není tak vysoká spotřeba energie a naopak relativní nedostatek biomasy v hustě osídlených oblastech, kde je spotřeba energie nejvyšší. Další nevýhodou biomasy je, že obsahuje kontaminanty, které obsahují velké množství vody, kyslíku a popela. Další nevýhodou je nízká energetická hustota ve srovnání s ropou, dřevní štěpka obsahuje 3 – 4 GJ/m³ a ropa 35 – 40 GJ/m³. Čtvrtou nevýhodou je různorodá struktura biomasy, která zvyšuje náročnost v průmyslových procesech.

Nevýhody biomasy lze odstranit pyrolýzou. Pyrolýzní olej je vyráběn z biomasy, která se nepoužívá pro potravinářské účely, získáváme tak tzv. bio-paliva 2. generace, které již nekonkurují potravinářskému průmyslu, jako je tomu např. při produkci bio-paliv z olejnatých rostlin. Přeprava pyrolýzního oleje je snadná a může pro ni být využita stávající infrastruktura, olej může být skladován po dlouhou dobu a využit v případě potřeby. Použití oleje pro výrobu tepla a elektrické energie se dosahuje nižší produkce skleníkových plynů než u ostatních biopaliv, konkrétně o 85 – 95%, zde může nahradit fosilní zdroje a doplnit ostatní obnovitelné zdroje jako je větrná a sluneční energie.

2.2 Dřevěné uhlí

Dřevěné uhlí je hlavním produktem při pomalé pyrolýze, je to silně hygroskopická, lehká a tvrdá látka, která obsahuje velké množství pórů, má vysoký obsah uhlíku a amorfni strukturu. Dřevěné uhlí má černou barvu s matným leskem, obsahuje 80 % uhlíku, 12 % prchavých látek, dále cca 8 % vody a popeloviny. Dosahuje výhřevnosti až 27,2 MJ/kg. Podíl uhlíku roste s rostoucí teplotou karbonizace, ta se standardně pohybuje okolo 400 °C, a může dosahovat až 90%. S rostoucí teplotou klesá



Obrázek 2.2 Dřevěné uhlí [23]

hmotnostní výtěžek dřevěného uhlí na úkor kapalných a plyných produktů. Následující tabulka (tabulka 2.2) ukazuje, množství dřevěného uhlí a obsah uhlíku v závislosti na teplotě karbonizace. Je-li uhlí dobře vypálené, láme se obtížně v rukou, málo černí a po rozlomení se leskne, při zapálení nehoří plamenem a nekouří. Pokud lze uhlí snadno rozlamovat, znamená to, že bylo páleno dlouho, nebo bylo robeno ze shnilého dřeva. Nedopálené uhlí má nehnědlou až rezavou barvu a po zapálení kouří a vyskakují z něj plaménky. [5]

Tabulka 2.2 Vliv karbonizačních teplot na dřevěné uhlí [5]

Karbonizační teplota [°C]	Hmotnostní výtěžek z absolutní sušiny dřeva [%]	Obsah uhlíku [%]
300	51,4	73,2
400	40,6	77,7
500	31,0	98,2
600	29,1	92,2
800	26,7	95,7
1000	26,8	96,7

Ačkoliv se dá dřevěné uhlí vyrobit z jakéhokoliv dřeva, k jeho výrobě se dnes používá především tvrdé listnaté dřevo, nejčastěji bukové a dubové, dále jasanové, habrové, javorové a také dřevo z břízy, topľů, olší, akátů nebo lip. Je potřeba aby dřevo pro výrobu dřevěného uhlí bylo dobře vyschlé, kvůli optimálnímu obsahu vlhkosti, který má být co nejnížší. V tabulce 2.3 jsou uvedeny hmotnostní a objemové výtěžky dřevěného uhlí při použití různých druhů dřeva. [5]

Tabulka 2 **Tabulka 2.2** Vliv karbonizačních teplot na dřevěné uhlí [5]

Dřevina	Výtěž dřevěného uhlí [%]	
	hmotnostní	objemová
buk, dub	20 - 22	52 - 56
bříza	20 - 21	65 - 68
borovice	22 - 25	60 - 64
smrk	23 - 26	65 - 75
větve	19 - 22	38 - 48

2.2.1 Využití dřevěného uhlí

Dřevěné uhlí se využívá v celé řadě odvětví. Stále je využíváno v hutnictví, při nauhličování ocelí, v kovářství nebo při výrobě karbidů a sirouhlíku. Zajímavé je využití tzv aktivního uhlí.

Aktivní uhlí

Z dřevěného uhlí se vyrábí aktivní uhlí využívané jako absorbent ve filtrech. Při aktivaci jde o zvětšení měrného vnitřního povrchu a tím i jeho kapacity. Po aktivaci je aktivní uhlí schopné absorbovat plyny a páry ze vzduchu či zbarvující částice z kapalin. Aktivace dřevěného uhlí se dosáhne rozemletím dřevěného uhlí na 2 – 20 µm, takto namleté uhlí se smísí, v poměru 1:3, s pojivem – škrobem a katalyzátorem. Po té se směs lisuje tlakem 10 MPa na pelety o průměru 1,8 – 8 mm s délkou odpovídající maximálně dvojnásobku průměru. Následně se pelety suší a karbonizují při teplotě 650°C, následuje třídění produktů podle velikosti. Aktivace se dosáhne vysokými teplotami za přítupu kyslíku, vodní parou a chemickými postupy. Aktivní uhlí se skladuje chráněné inertním plynem. Aktivní uhlí se používá i v lékařství, vyrábí se většinou z březového dřeva. Dokáže na sebe navázat střevní plyny, hnilobné produkty, bakterie, toxiny, chemické sloučeniny i léčiva. [5]

Živočišné uhlí

Menší množství aktivního uhlí vzniká i při pálení živočišných materiálů, především kostí obsahujících uhlík ve formě uhličitane hořečnatého. Prvními zdroji aktivního res. živočišného uhlí používaného v léčitelství byly ohořelé kosti, které se stále používají v lidovém léčitelství například k léčení hadího uštknutí. [5]

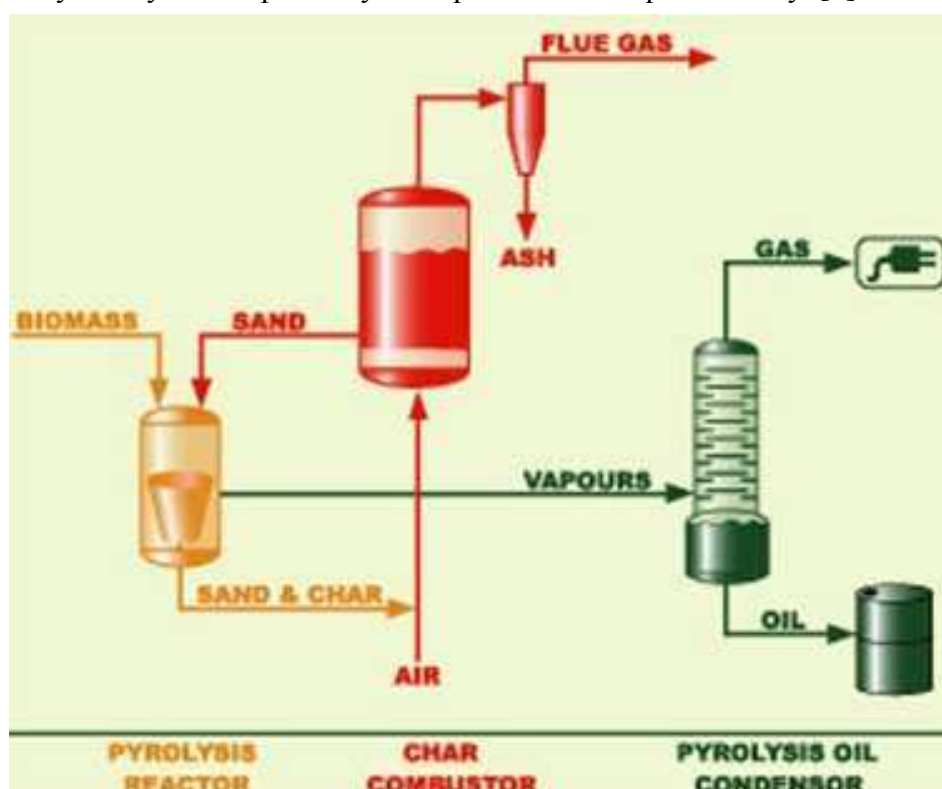
Využití při výrobě železa

V Brazílii je využíváno k výrobě dřevěného uhlí dřevo eukalyptu, pěstovaného na tamních plantážích. Jde o integraci lesnictví a hutnictví. Výhodou tohoto způsobu je omezení produkce o 600 kg a SO_x o 3 kg na každou tunu železa. Podíl vyrobeného železa pomocí dřevěného uhlí na celkové produkci dosahuje cca 22 %. Podobně jako u železa tomu je u olova, cínu, niklu, zinku, nebo při výrobě cementu. S tím souvisí i rozmach eukalyptových plantáží, přibude jich asi 72 000 ha ročně. [5]

2.3 Technologie rychlé pyrolýzy

Rotující kuželový reaktor

Tuto technologii vyvinula společnost BTG, což je Nizozemská společnost zabývající se transformací biomasy na alternativní paliva. Technologie využívá rotující kuželový reaktor. Částice biomasy se v reaktoru mísí s horkým pískem, obě složky se přivádějí u dna kužele a jeho rotace způsobuje, že pevné látky jsou vynášeny nahoru. V tomto typu reaktoru se dosahuje rychlého ohřevu a krátké doby setrvání plynné fáze, což je pro pyrolýzu důležité. Vzniklé páry postupují dále přes několik cyklónů, poté vstupují do kondenzátoru, kde jsou zchlazeny. Pevný produkt (dřevěné uhlí) je spálen pro ohřev písku a tak bylo zajištěno teplo potřebné pro pyrolytický proces, pyrolýzní plyny jsou také spáleny. Přebytné teplo se využívá pro sušení vstupní biomasy. [9]



Obrázek 2.3 Schéma technologie rotačního kuželového reaktoru [30]

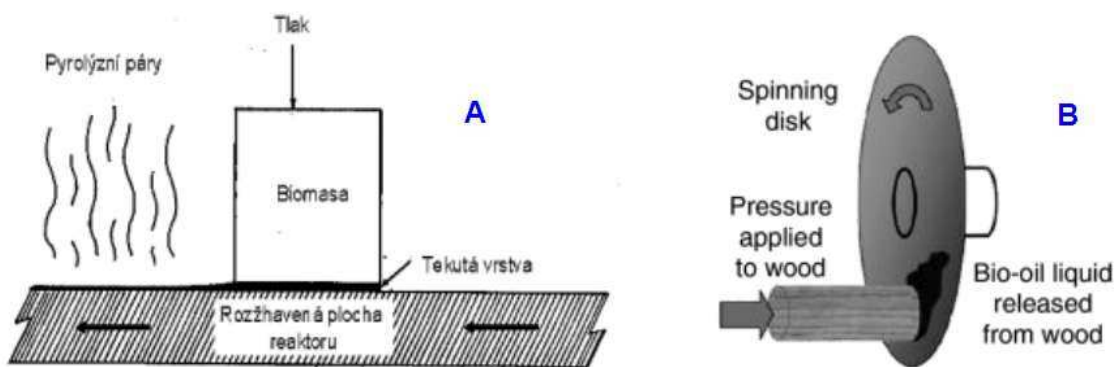
Pilotní jednotka společnosti BTG dokáže zpracovat 100 – 200 kg biomasy za hodinu a poskytuje reprezentativní údaje pro průmyslové použití. První pyrolýzní jednotka v průmyslovém měřítku byla instalována v Malajsii. Zpracuje 2 tuny biomasy za hodinu, materiál je dodáván z blízké palmové plantáže a před zpracováním se suší na 5 – 10% podíl vlhkosti. Výtěžky bio oleje jsou asi 1,2 tuny za hodinu. Další jednotka je plánovaná v Nizozemsku, má zpracovat 5 tun materiálu za hodinu. Co se týče materiálů, které se dají pomocí této technologie zpracovat, je jich celá řada, samozřejmě dřevo, energetické plodiny, sláma ale např. i drůbeží trus a mnoho dalších organických materiálů. Nicméně největší výtěžky pyrolýzního oleje poskytuje dřevní biomasa. Biomasa musí být před pyrolýzou vysušena na vlhkost menší než 10 % a nadrcena. Proces společnosti BTG dokáže přeměnit až 70 % hmotnosti biomasy na pyrolýzní olej, zbytek se přemění na dřevěné uhlí a plyn. Schéma technologie je zobrazeno na obrázku 2.3. [9]

Rychlý šnekový pyrolyzátor

Tato technologie byla vyvinuta v USA. Princip funkce je založen na přímém ohřevu vstupní biomasy horkými kuličkami. Horké kuličky a biomasa jsou spolu intenzivně promíchávány dvěma šneky. Reaktor dosahuje 40 – 50 hm. % výtěžku oleje, 25 – 30 hm. % koksu a 20 – 35 hm. % plynu. Zdrojem tepla může být koks nebo elektřina, doba zdžení částic v reaktoru nesmí překročit 2 sekundy. Reaktor pracuje za teplot 450 – 580 °C a kuličky k ohřevu biomasy mají teplotu 450 – 750 °C. Co se týče materiálů, které se v tomto reaktoru zpracovávají, jsou to částice o velikosti 0,5 - 1 mm (maximálně 2 mm) s vlhkostí menší než 15%. Reaktor zpracuje 1 – 2 kg materiálu za hodinu. [15]

Ablativní pyrolýza

Princip této metody, která byla vyvinuta v sousedním Německu společností PyTec, spočívá v ohřevu částic biomasy, které jsou řízeně vytlačovány na horký pohybující se plech nebo rotující kotouč, biomasa se na plechu začíná roztavovat. Výtěžky oleje jsou 65 – 75 hm. %, koksu 15 – 20 hm. % a plynu 10 – 15 hm. %. V reaktoru lze zpracovat částice o velikosti větší než 10 mm o vlhkosti nepřesahující 10 hm. %. Biomasa se před zpracováním suší plynem. Zdrojem tepla bývá koks, teplota v reaktoru je asi 500 °C a referenční čas 1 s. Reaktor zpracuje až 50 tun biomasy za den. [15]



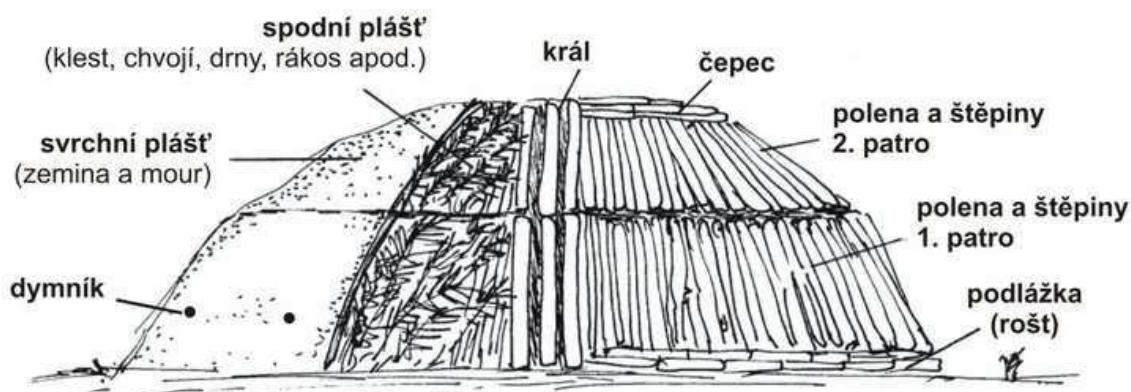
Obrázek 2.5 Schéma technologie ablativní pyrolýzy [15]

2.4 Technologie pomalé pyrolýzy

Nejjednodušší a ve světě stále užívaný způsob výroby dřevěného uhlí je výroba v jamách. Jáma bývá asi 1 m hluboká, je v ní založeno otevřené ohniště. Nové dříví se přikládá poté, co hořící ohniště začne kouřit. Po zaplnění jámy se dřevo v jámě pokryje drny a zeminou a nechá se 1-2 dny chladnout. Jelikož hoření probíhá za přístupu vzduchu, dosahuje se touto metodou malých výtěžků dřevěného uhlí. Dalšími technologiemi pro výrobu dřevěného uhlí jsou milíře, karbonizační pece a retorty. Rozdíl mezi těmito technologiemi je ve způsobu dodávání tepla – u milířů a karbonizačních pecí dodává teplo samo zuhelnatělé dřevo, u retort je teplo dodáváno zvenčí zahříváním pláště retorty. Dřevěné uhlí vyrobené v retortách je chemicky nejčistší. [5]

Výroba dřevěného uhlí v milířích

V dnes už dávných dobách se karbonizace prováděla v tzv. milířích následujícím způsobem. Milíř je dřevo naskládáno do několik metrů vysoké hranice obložené vrstvou drnu. Teplo bylo získáváno hořením dřeva v hranici, průduchy pro přívod vzduchu se po zahřátí utěsnily, oheň poté uhasl a začala působit vysoká teplota v prostředí bez kyslíku. Tento proces trval až několik dní, známkou ukončení procesu karbonizace bylo, že přestal unikat žlutý dým, pak mohlo dojít k rozebrání milíře. Kromě dřevěného uhlí byl využíván dřevěný dehet, ten se využíval například k utěšňování sudů, impregnací kůží nebo těsnění lodí. Další využití našel dehet po smíchání s lojem, vznikla tak kolomaz, používaná na mazání ložisek tehdejších kol. [5]



Obrázek 2.6 Milíř [33]

Karbonizační pece a retorty

Na území ČR se používají více než 60 let. Karbonizačních je dosaženo mezi 16. až 26. hodinou po zapálení náplně, v závislosti na použitém dřevu, tloušťce polen a vlhkosti dřeva. Teplota na konci procesu dosahuje 600 °C. Karbonizační pece mají oproti milířům regulovatelné přívody vzduchu ve spodní části pece a kontrolní otvory ve víku pece. [5]

2.5 Zhodnocení pyrolýzy

Výhody pyrolýzy

Jednou z výhod pyrolýzy je možnost ji provádět v relativně malých měřítkách i v lokalizovaných oblastech, tímto je biomasa zušlechtěna přímo na místě a dojde k ušetření nákladů na dopravu. Pyrolýza biomasy je atraktivním způsobem přeměny organické hmoty na energetické produkty, jež je možné využít k výrobě tepla, energie, pohonných hmot a různých chemikálií. Další výhodou je, že pyrolyticky můžeme zpracovat širokou škálu biomasy, od dřevních hmot až ke komunálním odpadům. Bio-olej může být dokonce použit v zemědělství jako půdní doplněk, protože zvyšuje schopnost půdy zadržovat vodu a živiny. V zemědělství může být využito i dřevěné uhlí, které zvyšuje kvalitu půdy. Proces pyrolýzy má relativně vysokou účinnost a je šetrný k životnímu prostředí. Rovněž je příležitostí pro zpracování zbytků ze zemědělství nebo lesnictví. [2]

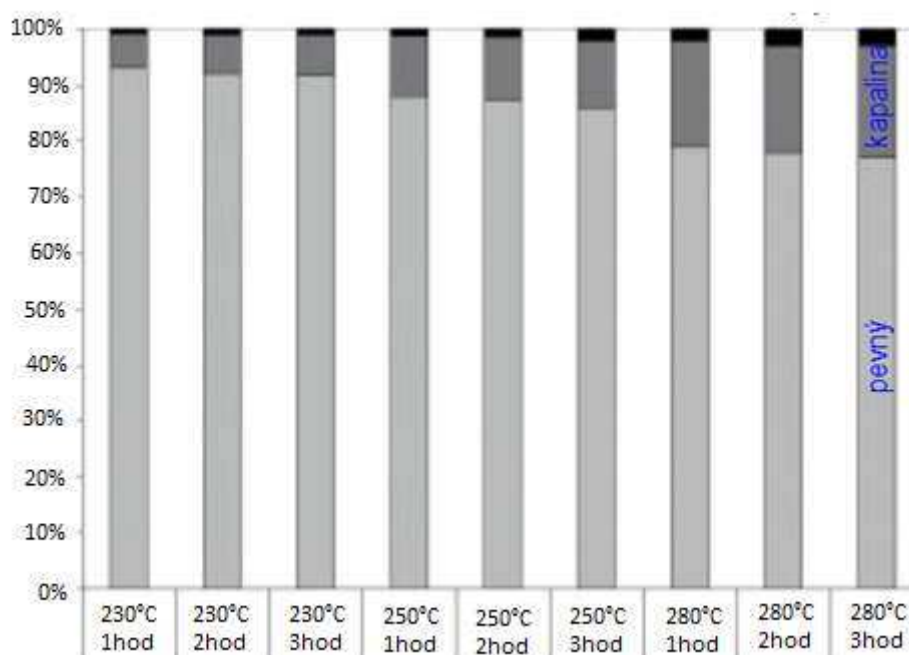
Nevýhody pyrolýzy

Bohužel je pyrolýz proces velmi závislý na vlhkosti ve vstupní surovině (měla by činit max. 10 %), vyšší obsah může negativně ovlivnit kvalitu výchozích produktů. Materiály jako čistírenské kaly je nutné před samotným zpracováním vysušit. Další nevýhodou je nutnost zajistit dobrý přenos tepla pro průběh endotermických reakcí. [2]

3. PRAŽENÍ - TOREFAKCE

Pražení je termická úprava biomasy, při které je biomasa zahřívána na teplotu mezi 200 a 300 °C v prostředí bez kyslíku. Celý proces torefakce zahrnuje přípravu materiálu – surového dřeva či jiné biomasy, samotnou torefakci a následnou výrobu pelet nebo briket. Pro proces pražení je vhodná biomasa s výrazným podílem celulózy, hemicelulózy a ligninu, co nejmenším množstvím vody a neměla by obsahovat nežádoucí příměsi. Dalším důležitým faktorem je chemické složení, vstupní biomasa nesmí obsahovat alkalické kovy, chloridy, těžké kovy nebo síru. Materiály, které obsahují velké množství vody, jako jsou například čistírenské kaly, se musí před pražením dehydrovat z cca 75% podílu na 15 – 45% podíl vlhkosti. Sušení může probíhat v sušicích zařízeních předřazeným samotnému pražicímu reaktoru, jedná se ale o relativně nákladný proces, jak z hlediska energetické náročnosti tak i co se týče nákladů na sušící zařízení. [4]

Účinnost procesu torefakce ovlivňuje několik faktorů – teplota procesu a doba ohřevu biomasy. Teplota procesu má být 230 - 280 °C. Za těchto teplot vzniká nejvíce pevného produktu, s rostoucí teplotou výtěžek pevného produktu klesá a roste podíl kapalných a plynných produktů. Doba ohřevu závisí na teplotě torefakce a způsobu ohřevu. Následující graf (obr. 3.1) ukazuje podíl jednotlivých složek v závislosti na teplotě a době zdržení čátic v reaktoru. [1]



Obrázek 3.1 Podíl výstupních produktů v závislosti na teplotě a době zdržení v reaktoru [15]

3.1 Torefikované pelety a brikety

Pražením vzniká z původní biomasy velice kvalitní palivo (ilustrační obrázek 3.2) s vlastnostmi blízcími se vlastnostem fosilního uhlí. Zvýšení výhřevnosti se dosahuje odstraněním vlhkosti a některých organických sloučenin z původní biomasy. Produkty vzniklé pražením se peletizují, tak získají vyšší objemovou hustotu energie a tím také dochází k nemalým finančním úsporám při skladování a přepravě. Ukázalo se, že pražená biomasa je nenávratně hydrofobní, proto ji lze skladovat ve



Obrázek 3.2 Torefikované pelety [35]

venkovních prostorách a relativně odolná vůči hnilobným procesům, je snadněji drtitelná a obsahuje vyšší koncentrace ligninu, a je tedy dobře stlačitelná bez dalších přísad. Také se zjistilo, že torefikované pelety vzplanou rychleji než uhlí, urychlují spalování, zlepšují energetickou výkonnost kotlů a snižují produkci popela. Torefikací se zvyšuje energetická hustota biomasy a výhřevnost, která je 18 – 23 MJ/kg. Při torefikaci je snížen obsah vlhkosti, kyslíku a vodíku, zvyšuje se obsah uhlíku, dochází k redukci velikosti částic biomasy. Torefikací se zlepšují se spalovací vlastnosti biomasy pro energetické a materiálové zpracování (mletí, drcení). Torefikace je důležitá pro přípravu biomasy ke zpracování v práškových a hořákových spalovacích nebo zplyňovacích zařízeních. Následující tabulka (tabulka 3.1) srovnává vlastnosti torefikovaných pelet, dřevěných pelet a hnědého uhlí, jak je vidět, jsou torefikované pelety opravdu perspektivním a kvalitním palivem.

Tabulka 3 Vlastnosti dřevěných torefikovaných pelet, dřevěných pelet a hnědého uhlí

	Výhřevnost [GJ/t]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Obsah popela [%]	Obsah síry [%]	Odolnost proti vodě	CO ₂ neutralita
Torefikované pelety	22 - 26	< 800	< 2	< 0,1	ano	ano
Dřevěné pelety	16 - 19	< 600	< 2	< 0,1	ne	ano
Hnědé uhlí	17 - 19	< 800	8 - 16	4 - 10	ano	ne

3.1.1 Využití torefikovaných pelet a briket

Díky svým vlastnostem, podobným uhlí, se využívají především v elektrárnách, kde jsou spoluspalovány s uhlím. Dalším možností využití je pro vytápění v domácnostech nebo v průmyslových provozech. Torefikovaná biomasa se využívá i metalurgickém průmyslu ve formě aktivního uhlí nebo pro výrobu alternativních paliv.

Spoluspalování s uhlím v tepelných elektrárnách

Použití uhlí a torefikované biomasy je v dnešní době poměrně rozšířenou praktikou a zájem o torefikované pelety se stále zvyšuje. Pokud by pelety či brikety byly spalovány místo uhlí v kogeneračních zařízeních, výrazně by se snížily emise skleníkových plynů, což je jedním z cílů Evropské unie. V ideálním případě by podíl torefikovaných pelet mohl dosahovat až 80 % spolu s fosilním uhlím, kdežto podíl dřevěných pelet se pohybuje pouze mezi 5 a 10 %. [24]

Použití v metalurgickém průmyslu

Torefikovaná biomasa má potenciální využití i metalurgii, například při zpracování železa může být použita jako redukční činidlo a nahradit tak koks. Výhodou použití v tomto odvětví je, že při spalování pražené biomasy nevznikají emise oxidu siřičitého. I když má torefikovaná biomasa malý obsah těkavých látek, je ale výhodnější použít dřevěné uhlí. [24]

Použití jako aktivní uhlí

Torefikovaná biomasa, stejně jako dřevěné uhlí, může být využita ve formě aktivního uhlí, které se používá při úpravě vody a plynů, odkud absorbuje nežádoucí organické i anorganické látky. [24]

Výroba alternativních paliv

Dalším důležitým odvětvím pro aplikaci produktů pražení biomasy je výroba kvalitních paliv. Z těchto produktů je možné vyrábět kapalná i plynná paliva. Bio-ole se vyrábí standardní pyrolýzou a dosahuje dokonce lepších vlastností než bio-olej vyrobený ze surové biomasy. Bio-olej z pražené biomasy má menší vlhkost a lepší resp. nižší poměr O/C. Dále se z pražené biomasy zplyňováním vyrábí syntézní plyn, který lze salovat v kogeneračních zařízeních. [24]

3.1.2 Výhody torefikovaných pelet

Torefikovaná biomasa má vyšší výhřevnost, větší hustotu energie, lepší fyzikální vlastnosti (tvarová stálost, stejnorodost, hydrofobní chování). Náklady na jejich přepravu jsou relativně nízké, protože mají vyšší energetickou hustotu, než např. obyčejné dřevěné pelety a díky jejich odolnosti proti vlhkosti je přeprava i skladování snazší a praktičtější. Výhodou spoluspalování pelet s uhlím v tepelných elektrárnách je skutečnost, že zařízení pro spalování je třeba pouze minimálně upravit, není tak nutné pro spalování torefikovaných pelet stavět či vymýšlet nová zařízení. Spalováním torefikovaných pelet je vyráběna čistá, ekologická a uhlíkově neutrální obnovitelná energie. Bylo zjištěno, že při použití 70% torefikovaných pelet společně s uhlím bylo znečištění minimální a při spoluspalování s obyčejnými dřevními peletami přesahovalo znečištění hranici 10%. A na rozdíl od spoluspalování dřevěných pelet se dosahuje při použití pelet torefikovaných téměř jmenovitého výkonu elektráren. Další výhodou mají pražené pelety v tom, že obsahují pouze malé množství popela ve srovnání s uhlím a malý obsah síry. Výrobu energie z torefikovaných pelet lze na rozdíl od jiných zdrojů, jako je větrná nebo sluneční energie, které nemusí vyhovovat požadavkům sítě, řídit, proto je pražená biomasa, jednou z mála alternativ jak zachovat stabilní množství vyráběné energie v tepelných elektrárnách a omezit tak používání fosilních zdrojů. Torefikované pelety jsou jako obnovitelný zdroj v mnoha zemích podporovány dotacemi, což snižuje náklady na jejich produkci. [13]

3.2 Technologie pro pražení biomasy

Reaktory pro torefakci mají za úkol ohřívat biomasu na požadovanou teplotu, přičemž dochází k vysušení zbytkové vlhkosti a udržovat surovinu na této teplotě po stanovenou dobu. Reaktory dělíme do dvou kategorií – s nepřímým ohřevem a přímým ohřevem. V současné době se na trhu vyskutují technologie původně vyvinuté pro jiné aplikace a následně upravené pro proces pražení biomasy. Vhodnost technologie ovlivňuje velikost částic. Existuje mnoho technologií, které dokáží zpracovat buď velké, nebo malé částice, ale jen velmi málo technologií, které si umí poradit s různými velikostmi. Nicméně biomasu lze na potřebnou velikost upravit, to ale přináší další náklady.

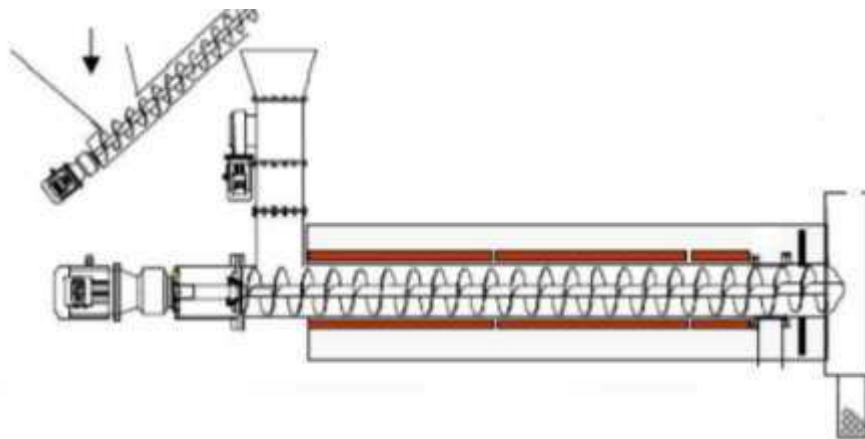
Nepřímý ohřev - Na tomto principu je založena většina technologií pomalé pyrolýzy ale i některé technologie pro sušení biomasy. Při nepřímém ohřevu je biomasa v nepřímém styku s nosičem tepla, styk je realizován prostřednictvím stěny reaktoru. Nosičem tepla je olej, plyn nebo vodní pára.

Přímý ohřev - Biomasa je v přímém styku s nosičem tepla v plynném stav. Nosičem může být přehřátá pára. Tento způsob využívá většina technologií pro sušení biomasy i mnoho technologií pro zplyňování biomasy.

Pro pražení biomasy se využívají například následující technologie.

Šnekový reaktor

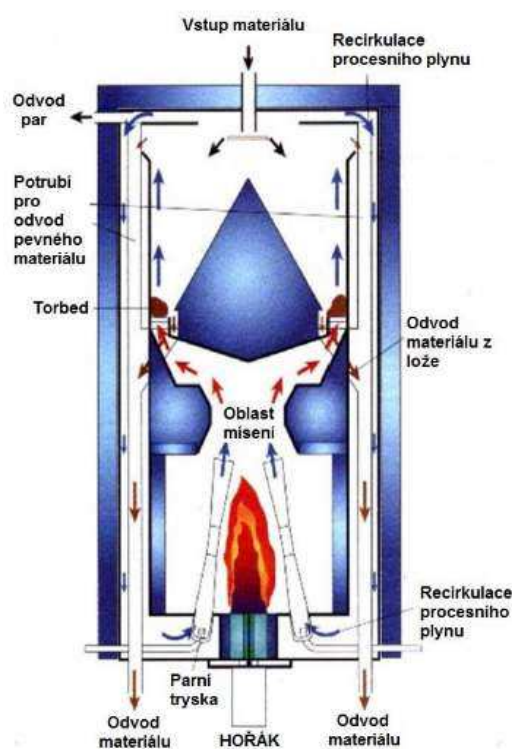
Tento typ reaktoru, jak je zobrazeno na obrázku 3.2 se skládá z jednoho nebo i více šnekových šroubů. Ohřev je nejčastěji nepřímý pomocí otopné kapaliny vedené uvnitř šroubu nebo v obalu reaktoru. Doba zdržení materiálu v reaktoru závisí na jeho délce a rychlosti otáčení šroubu. Ve srovnání s jinými je tato technologie méně finančně náročná. Technologie funguje tak, že např. pásovým dopravníkem je předupravená biomasa dodávána do násypky, odkud je prostřednictvím šnekového šroubu odebírána do reaktoru, kde je ohřívána na požadovanou teplotu. Na výstupu získáme bio-uhlí, které se následně musí hodně upravit. [1]



Obrázek 3.2 Schéma šnekového reaktoru [1]

Torbed technologie

Princip technologie ukazuje obrázek 3.3. Tato technologie se používá pro různé účely, např. pro spalování materiálu byla upravena i pro pražení. Zařízení pro pražení jsou ve zkušebních provozech. Obecně mají tyto zařízení velmi malou výkonnost (2 kg zpracovaného materiálu za hodinu), ale bylo uvedeno do provozu zařízení odpovídající komerčnímu využití. Tato technologie funguje tak, že je do spodní části vysokou rychlostí (50 – 80 m/s) vháněna teplotonosná látka. Částice biomasy jsou přiváděny vrchní částí reaktoru. Vzhledem k vysoké rychlosti vháněného vzduchu jsou částice biomasy unášeny jak v horizontálním, tak i vertikálním směru, tak dochází ke vzniku toroidních vírů a k intenzivnímu přenosu tepla a tím k pražení biomasy. [1]



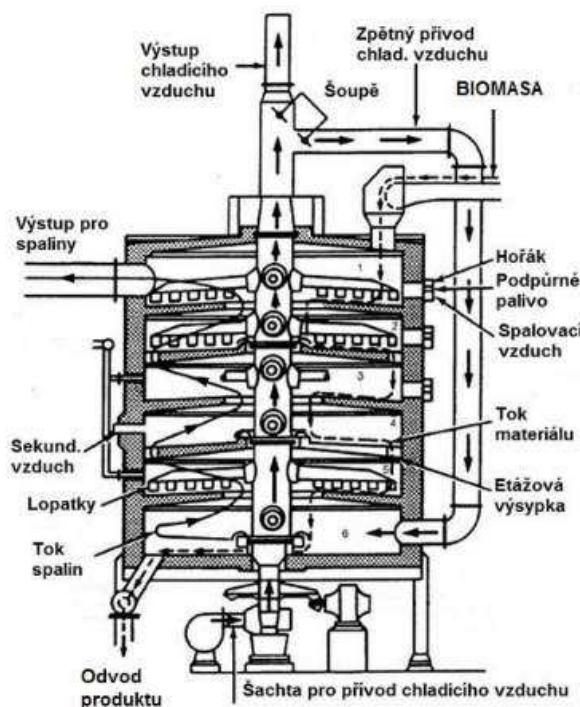
Obrázek 3.3 Princip Torbed Technologie [1]

Válcová pec

Vytápění stěny reaktoru může být realizován přímo – pomocí syté páry ohříváné spaliny nebo nepřímo – plynový nebo elektrický ohřev. Proces pražení se řídí změnou teploty pražení, změnou otáček pece nebo úhlem naklonění válce. [1]

MHF technologie (etážová pec)

Kontinuální reaktor tvoří několik pater, jak je vidět na obrázku 3.4, v každém probíhá jiná fáze pražení. Teplota se postupně zvyšuje z 220 °C na 300 °C. Biomasa je do reaktoru vtlačována pomocí dopravníku. Díky rotujícím lopatkám propadáva materiál do spodnějších pater a je zahříván hořáky nebo vstřikováním horké páry. V hořácích můžou být spalovány zbytkové produkty z pražení nebo zemní plyn. Technologie umožňuje zpracování rozličných částic biomasy od pilin po velké štěrky. Zpracování biomasy trvá asi 30 minut. [1]



Obrázek 3.4 Princip MHF technologie [1]

Technologie pohyblivého kompaktního lože

V tomto typu reaktoru je materiál dávkován vrchní částí reaktoru, ten se pohybuje v důsledku proudění teplotnosné látky proudící směrem nahoru ze spodní části. Pražený materiál je odváděn ze spodní části reaktoru, kde je také ochlazován. Teplota pražení bývá 300 °C a doba zdržení biomasy v reaktoru 30 až 40 minut. [1]

Technologie TorWash

V Nizozemí probíhá výzkum nové technologie pro pražení biomasy s vysokým podílem vody - čistírenských kalů, chlévské mrvy aj. Tyto materiály nejsou pro proces pražení vhodné, kvůli vysokému obsahu vlhkosti a musí být pro použití v předešlých technologiích vysušeny asi na 15% podíl vlhkosti. Technologie pro pražení vlhké biomasy se nazývá TorWash a spočívá v pražení za vysokého tlaku ve vodě. K odstranění nečistot tak dojde přímo v procesu, ale vzniká velké množství odpadní vody, která se musí odstranit asi na 40% podíl vlhkosti. Výsledný produkt a účinnost celého zařízení ovlivňuje původní množství vlhkosti v původní biomase. [1]

3.3 Zhodnocení pražení

Proces pražení biomasy má, tak jako každá metoda, několik výhod i nevýhod. Nevýhodou je obtížnější příprava pelet a briket, riziko samovznícení a zahoření, ke kterému dochází mezi 150 – 170 °C. Výhodou je získání nového kvalitního hydrofobního paliva s vysokou výhřevností, které dobře odolává biodegradativním procesům. Torefikovaná biomasa je dobře melitelná a náklady na její přepravu a skladování jsou nižší. Torefakce v posledních letech nabývá na důležitosti. Vzniklý produkt může jako palivo nahradit dřevěné uhlí v řadě výše uvedených aplikací. Torefakce biomasy má potenciál se stát důležitou metodou zušlechťování biomasy pro výrobu velmi kvalitních tuhých paliv s dobrými vlastnostmi.

5. ZPLYŇOVÁNÍ BIOMASY

Zplyňování je obdoba pyrolýzy, ale rozdíl je v tom, že žádaným produktem je plyn, nazývaný výhřevný, syntézní či generátorový plyn. Zplyňování je dosaženo použitím zplyňovacího média, čímž může být čistý kyslík, vzduch, vodní pára, nebo kyslík smíchaný s vodní párou, vyšší teplotou a delším reakčním časem. Zplyňování, na rozdíl od spalování, probíhá za podstechiometrického množství kyslíku (obvykle asi 1/3 množství, které by bylo třeba pro spálení biomasy) při teplotách 1000 – 1500°C. Při použití kyslíku nebo vzduchu jako zplyňovacího média dochází k nedokonalému spalování biomasy, čímž vzniká teplo, které je potřebné pro průběh pyrolýzních a zplyňovacích procesů, je-li použita vodní pára, musí být zajištěn přívod tepla zvenčí. [25]

Celý proces zplyňování se skládá ze čtyř základních pochodů – sušení, pyrolýza, redukce a oxidace. V následujícím textu je uvedena charakteristika jednotlivých pochodů: [13]

- **Sušení biomasy** probíhá asi při 200 °C a dosahuje se jím optimálního množství (max. 15 %) vlhkosti v biomase.

- Při **pyrolýzním procesu** probíhají reakce v pevné i plynné fázi, jež ovlivňují kvalitu výsledného plynu. Mezi teplotami 300 – 500 °C dochází k suché destilaci, kdy dochází ke štěpení vysokomolekulárních organických látek a přeměně na plynné, kapalné a pevné produkty. Po překročení teploty 500°C až do 700°C se vzniklé produkty dále štěpí a transformují se z pevných a kapalných látek na plyny – H_2 , CO, CO_2 , CH_4 . Hlavní složky plynu jsou oxid uhelnatý CO, oxid uhličitý CO_2 , metan CH_4 , vodík H_2 , vodní pára H_2O , výhřevnost plynu je 3,5 až 8,9 MJ/m³.

- K **oxidaci** dochází po přívodu oxidačního média, přičemž dochází ke spalování, při kterém se uvolňuje teplo, které je dodáváno endotermickými reakcím.

- **Redukce** probíhá za nepřístupu kyslíku, využívá se pro výrobu spalitelných látek v plynu, ty vznikají redukcí oxidu uhličitýho na oxid uhelnatý, redukcí vodní páry na vodík, současně vzniká metan reakcí uhlíku s vodíkem. Redukce probíhá za nepřístupu kyslíku.

Procesy mohou probíhat buď postupně, nebo souběžně v závislosti na použité technologii. Například u sesuvných generátorů probíhají reakce postupně a v případě fluidních generátorů reakce probíhají souběžně. Při sušení, pyrolýze a redukcí je nutný přísun tepla, protože se jsou to procesy spotřebovávající teplo – endotermní, oxidace je exotermický proces. Jak bylo naznačeno výše, teplo pro endotermní procesy může být materiálu dvěma způsoby – přímo nebo nepřímo, pak rozdělujeme zplyňování na přímé a nepřímé. [13]

Přímé zplyňování (autotermní)

Teplo potřebné k uskutečnění reakcí je získáváno přímo v reaktoru. Přísun tepla je dosažen spálením části samotného paliva (obvykle 20-25 hm. %), aby docházelo ke spalování, musí být do reaktoru přiváděn kyslík. Výhodnější je použít čistý kyslík, který je ale poměrně nákladný. Proto je nejčastěji používán vzduch, použití vzduchu má

však nevýhodu v tom, že dusík obsažený ve vzduchu naředí produkovaný plyn a tím dojde ke snížení jeho výhřevnosti. [17]

Nepřímé zplyňování (alotermní)

V případě alotermního spalování je teplo přiváděno do reaktoru z okolí, toho je dosahováno například ohřátím stěn reaktoru, dodáváním předem ohřátého paliva a zplyňovacího média nebo dodáním horkého inertního materiálu (např. písku) přímo do reaktoru. Nevýhodou je, že tento způsob zplyňování vyžaduje složitější technologie a vyšší náklady pro zabezpečení přísunu tepla ke zplyňování. [17]

5.1 Syntézní plyn

Produktem zplyňování je plyn nazývaný syntézní nebo generátorový. Skládá z mnoha složek, hlavními jsou výhřevné plyny – oxid uhelnatý, vodík a metan, dále balastní plyny – dusík a oxid uhličitý a vodní pára. Další složkou plynu jsou nečistoty – dehet, prach, sloučeniny S, Cl, N, ty je třeba z plynu odstranit. Přesné stanovení složení není možné, protože závisí na fyzikálně-chemických vlastnostech vstupní biomasy, na typu použitého generátoru a podmínkách za jakých je provozován. Výhřevnost plynu se liší i od způsobu zplyňování. V případě autotermního zplyňování získáváme plyn s výhřevností 2,5 – 8,0 MJ/m³, kdy je jako zplyňovací médium použit vzduch, při alotermním zplyňování je dosahováno vyšší výhřevnosti – až 14 MJ/m³. Následující tabulka (tabulka 4.1) ukazuje složení výhřevného plynu vzniklého zplyněním dendromasy a jeho výhřevnost při použití různých zplyňovacích médií v kombinaci s různými metodami zplyňování. [3]

Tabulka 4.1 Výhřevnost a složení syntézního plynu v závislosti na zplyňovacím médiu [3]

Zplyňovací médium	vzduch	pára	paro-kyslíková směs
Výhřevnost [MJm ⁻³]	4 - 6	12 - 14	12 – 15
H ₂ [%]	11 - 6	35 – 40	25 – 30
CO [%]	13 - 18	25 – 30	30 - 35
CO ₂ [%]	12 - 16	20 – 25	23 – 28
CH ₄ [%]	3 - 6	9 - 11	8 – 10
N ₂ [%]	45 - 60	< 1	< 1

5.1.1 Čištění syntézního plynu

Ve výsledném plynu se vždy nachází určité nečistoty, konkrétně se jedná o pevné částice, dehet, alkálie, sloučeniny síry (H₂S, CS₂ a organické sloučeniny), dusíku (NH₃ a HCN), halogenů a jiné. Protože nečistoty v syntézním plynu jsou nežádoucí, je třeba ho vyčistit. Množství nečistot závisí na složení původní biomasy i na typu generátoru. Obecně existují dva základní přístupy k čištění plynu – primární opatření a sekundární opatření.

- **Primární opatření** - Smyslem primárních opatření je, aby nečistot vzniklo co nejméně resp. Předcházet jejich vzniku. Lze toho dosáhnout úpravou zplyňovacího procesu - pomocí volby vhodného zplyňovacího média, teploty nebo tlaku zplyňování. [3]

- **Sekundární opatření** - Sekundární opatření má za cíl odstranit již vzniklé nečistoty a to prostřednictvím cyklónů nebo filtrů. Existují dva základní přístupy k sekundárnímu čištění plynu – nízkoteplotní a vysokoteplotní. Při nízkoteplotním čištění nastává kontakt plynu s kapalinou (olejem nebo vodou), plyn je tak ochlazen pod bod varu těchto kapalin. Bohužel při ochlazování a znovuzahřívání plynu dochází ke ztrátám energie, proto se v některých aplikacích používá druhý způsob. Při vysokoteplotním čištění plynu dochází k jeho ohřevu na vyšší teplotu a nečistoty jsou odstraněny pomocí sorpčních a katalytických metod. [3]

5.1.2 Využití syntézního plynu

Primární využití syntézního plynu je v produkci alternativních pohonných hmot. (např. methanolu a motorové nafty). Proces výroby pohonných hmot je založen na procesu Fischer – Tropšovy syntézy. Ze syntézního plynu je možné vyrobit vodík, dusík, amoniak, oxid uhelnatý, oxid uhličitý, síru, různé minerály a pevné látky, jejichž obsah závisí na složení a vlastnostech původní biomasy. Další možnosti úpravy a využití je mikrobiální fermentace syntézního plynu, která může být použita k vývoji paliv a chemikálií, jako etanol, butanol, kyselina octová, kyselina máselná nebo methan. [12]

Kombinovaná výroba tepla a elektrické energie

Vyčištěný a upravený syntézní plyn o vhodném tlaku se využívá ke kombinované výrobě - kogeneraci tepla a elektrické energie v tepelných strojích, tepelnými stroji se rozumí plynové motory, turbíny, či v palivové články. Použití jednotlivých zařízení je závislé na požadovaném výkonu dále i na čistotě plynu. [3]

- **Plynové motory** - Plynový motor připojený na generátor elektrické energie je v dnešní době jedinou komerčně používaným zařízením pro výrobu elektrické energie ze syntetického plynu. Pro správný chod motoru je nutné, aby byl plyn vyčištěný od dehtů, které nesmí přesahovat 100 mg/m^3 dále je nutné odpařit plyn, aby podíl pevných částic nepřesahoval 5 mg/m^3 . [3]

- **Spalovací turbíny** - Teoreticky je možné pro výrobu energie využít i plynové turbíny, využití v průmyslovém měřítku je ale nevýhodné, protože plynové turbíny mají vysoké nároky na čistotu plynu, což zvyšuje náklady na nákup a provoz zařízení k jeho čištění. Ačkoliv jsou spalovací turbíny součástí paroplynového cyklu a mají tak velkou energetickou účinnost přeměny biomasy resp. syntézního plynu na elektrickou energii, neočekává se kvůli velkým investičním nákladům využití v decentralizované výrobě tepla a elektřiny z biomasy tímto způsobem. [3]

- **Palivové články** - Palivové články přeměňují chemickou energii na elektrickou a dosahují vyšší energetické účinnosti přeměny energie než ostatní zařízení. Existuje několik typů palivových článků, vysokoteplotní články pracují za teplot 600°C a dále se dělí podle použitého elektrolytu. Využití v praxi naráží na stejné problémy jako u spalovacích turbín, plyn musí být vyčištěn na velmi vysokou úroveň, především zbaven sirných sloučenin, na obsah lehkých dehtů nejsou palivové články až tak náchylné.

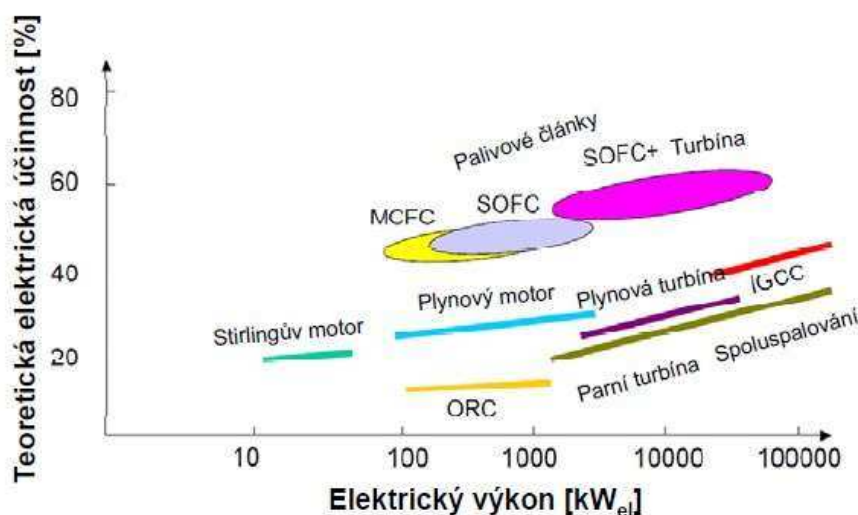
Nevýhodou palivových článků je jejich vysoká cena, ale do budoucna je se očekává potenciální rozmach této technologie. [3]

Výhody a nevýhody použití syntézního plynu v oblasti kogenerace [17]

Při použití syntézního plynu v oblasti kombinované výroby tepla a elektrické energie se dosahuje úspory primárních paliv a provozní náklady. Při spalování plynu se dosahuje vyšších teplot a nesou produkovány tuhé emise, také dochází ke snížení produkce CO_2 , SO_2 a oxidů dusíku na jednotku výkonu.

Nevýhodou je nutnost plyn čistit – především od dehtů. Dále pak vyšší investiční náklady na pořízení zplyňovacího zařízení, které ale z části pokrývají dotace z Evropské unie.

Následující obrázek názorně ukazuje vhodnost jednotlivých zařízení pro požadovaný výkon a jejich účinnosti, zobrazuje nejen výše uvedené plynové stroje ale i další energetické stroje.



Obrázek 4.1 Vhodnost jednotlivých zařízení pro požadovaný výkon a jejich účinnosti [17]

Produkce plynných a kapalných paliv ze syntézního plynu [17]

Další využití nalezl generátorový plyn pro produkci plynných a kapalných paliv (např. DME, H_2 , SNG). Plyn pro výrobu těchto paliv musí obsahovat co nejméně nežádoucích složek, které by mohly způsobit deaktivaci katalyzátorů v procesu výroby. V praxi se využívají dva způsoby konverze plynu na alternativní paliva – přímý a nepřímý.

- **Přímý způsob** využívá Fischer-Tropschovu syntézu, což je řada chemických reakcí, které převádějí oxid uhelnatý a vodík na kapalně uhlovodíky nebo methanizaci.

- **Nepřímá přeměna** probíhá ve dvou krocích, v prvním dochází k syntéze metanolu, který je ve druhém kroku přeměněn na uhlovodíky nebo dimethylether.

5.2 Technologie pro zplyňování biomasy

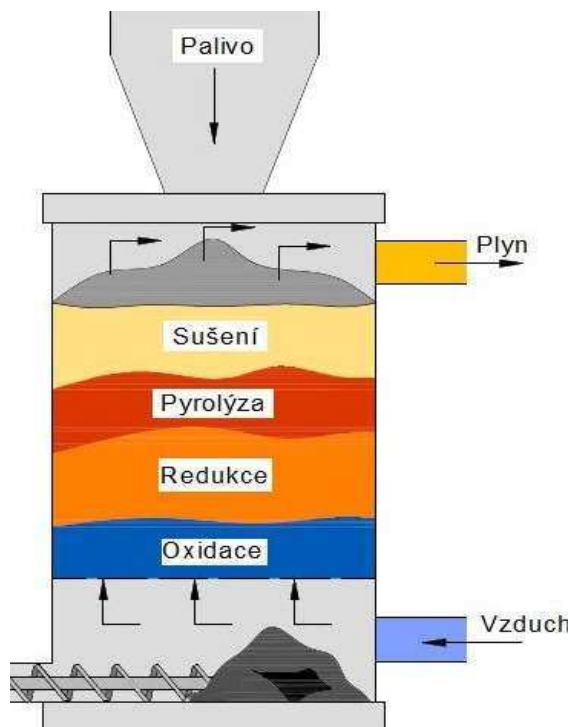
Existuje mnoho typů reaktorů, které prošly velkým vývojem k zajištění co nejvyšší výkonnosti a účinnosti. Reaktory dělíme: dle konstrukce - reaktory s pevným ložem, s fluidním ložem, s unášivým proudem; podle zplyňovacího média - parní, parokyslíkové, kyslíkové a vzduchové; podle zdroje tepla - autotermní a alotermní.

5.2.1 Zplyňovací reaktory s pevným ložem

Tyto reaktory se v praxi používají nejvíce. Teplo potřebné pro zplyňování může být do reaktoru dodáváno přímo nebo i nepřímě. Tento typ reaktorů se dále dělí na souproudé a protiproudé a s křížovým prouděním, což závisí na směru toku pevných částic a proudu plynu. Další dělení je podle směru proudění plynu reaktorem na vzestupné nebo klesající. Reaktory jsou navrhovány tak, aby bylo vyprodukováno co nejméně dehtů a ostatních nečistot.

Protiproudé reaktory

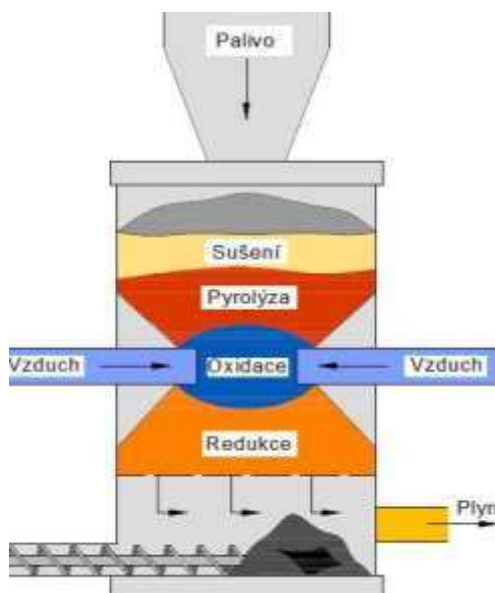
Tyto reaktory patří mezi nejrozšířenější, umožňují zpracování různých druhů biomasy, včetně materiálů s až 30% vlhkostí. Zpracovávaná biomasa je přiváděna horní částí reaktoru a pohybuje se směrem dolů. Zplyňovací médium se přivádí ze spodu. Vzniklý plyn postupuje směrem vzhůru a prochází redukčním, pyrolýzním a sušícím pásmem přitom se ochladí pod 250 °C a pohlcuje produkty pyrolýzy a vodní páru. Celý proces je schematicky znázorněn na obr. 4.2. Plyn vyrobený v protiproudém reaktoru má výhřevnost cca 6 MJ/m³ a nízkou teplotu. Nevýhodou zařízení je vznik nízkovýhřevného plynu při náběhu a vyšší obsah dehtových látek a produktů vzniklých při pyrolýze. [10]



Obrázek 2.3 Protiproudý reaktor [10]

Souproudé reaktory

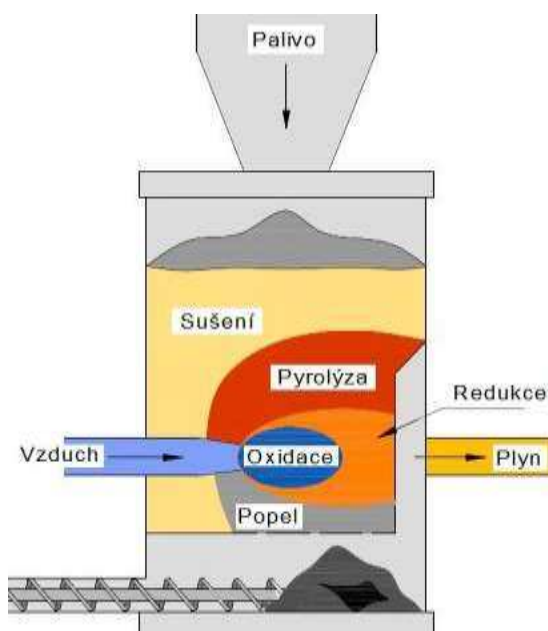
U souproudého reaktoru, jehož princip je zobrazen na obr. 4.3, je, stejně jako v předchozím případě, palivo přiváděno vrchem, ale zplyňovací médium je přiváděno shora nebo z boku. V tomto případě vyrobený plyn, který dosahuje výhřevnosti až 5 MJ/m^3 , proudí ve směru přívodu biomasy. Na rozdíl od předchozího typu reaktoru zde vzniká méně pyrolýzních produktů. Nevýhodou je ale vyšší teplota plynu a vyšší obsah prachových částic. [10]



Obrázek 3.3 Souproudý reaktor [10]

Reaktory s křížovým tokem

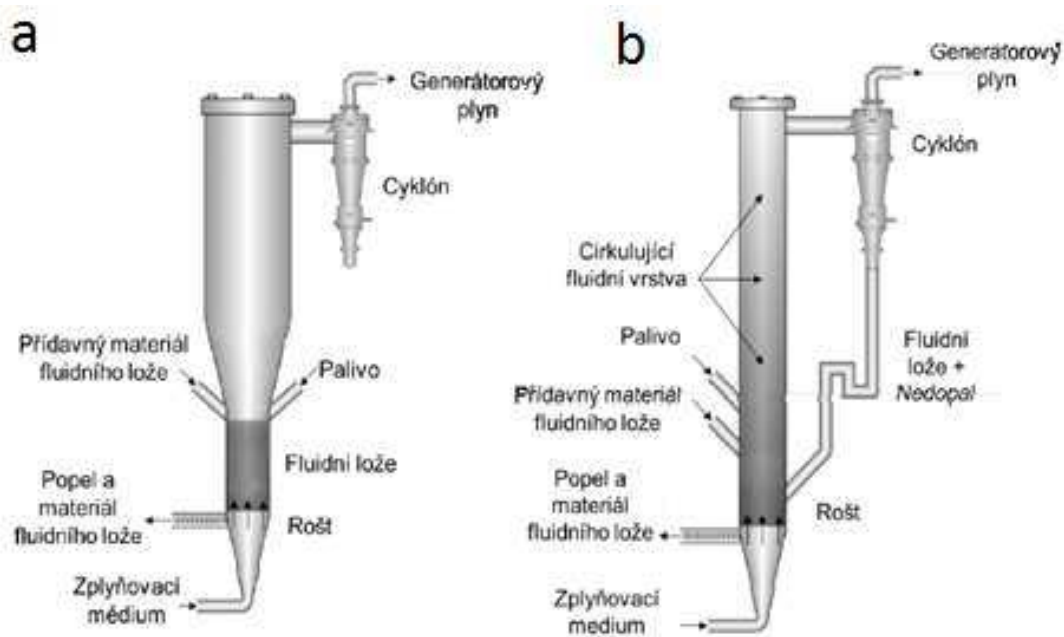
Dalším typem jsou reaktory s křížovým tokem (obrázek 4.4), ve kterých proces zplyňování probíhá za teplot až 1500°C , za těchto teplot mohou vzniknout problémy s odolností konstrukčního materiálu reaktoru. Výhodou vzniklého plynu je snadné čištění, ke kterému postačuje cyklon a filtr. [10]



Obrázek 4.4 Reaktor s křížovým tokem [10]

5.2.2 Reaktory s fluidním ložem

Tyto generátory jsou založeny na probublávání vrstvy zrnitého materiálu (v případě biomasy to bývá písek) zplyňovacím médiem. Zplyňovací médium proudí takovou rychlostí, že dochází ke vznosu částic vrstvy, která se pak chová téměř jako kapalina, tento proces se označuje jako fluidace. U fluidních reaktorů probíhají všechny procesy zplyňování současně. Ke zplyňování biomasy dochází v rozmezí teplot 750-950 °C, pokud chceme omezit obsah dehtu v plynu, je nutné použít vyšší teploty. Výhodou těchto generátorů je rychlé promíchávání vrstvy a s tím spojená rovnoměrná distribuce tepla. Ve fluidních reaktorech lze zpracovávat palivo s proměnlivou vlhkostí, různým složením a vyšším obsahem popela, používají se piliny, štěrka nebo pelety o velikosti 2 – 20 mm. Ve fluidní vrstvě dojde ke spálení cca 25 % paliva a zbytek je zplyněn. Existují reaktory se stacionární a cirkulující fluidní vrstvou. [3]



Obrázek 4.5 fluidní reaktor, a – se stacionární fluidní vrstvou; b – s cirkulující fluidní vrstvou [3]

Fluidní reaktory se stacionární fluidní vrstvou (obrázek 4.5a)

U reaktorů se stacionární fluidní vrstvou proudí zplyňovací médium rychlostí 0,3 – 0,5 m/s. Fluidní vrstva má viditelnou hladinu, což znamená, že rozhraní mezi vrstvou a prostorem nad ní se dá rozlišit. Tento reaktor má velmi dobré vlastnosti a je hojně využíván. [3]

Fluidní reaktory s cirkulující fluidní vrstvou (obrázek 4.5b)

V reaktorech s cirkulující fluidní vrstvou proudí médium rychlostí 3-10 m/s. Neexistuje zřetelná hranice mezi vrstvou a prostorem nad ní, protože hranici tvoří až vršek reaktoru. Lože s jemnějšími částicemi paliva je recirkulováno a větší částice zůstávají v loži déle. Fluidní vrstva má rozdílnou hustotu – u dna reaktoru nejvyšší a u stropu nejnižší. [3]

Výhody a nevýhody reaktoru s fluidním ložem vůči reaktoru s pevným ložem [10]

Výhody

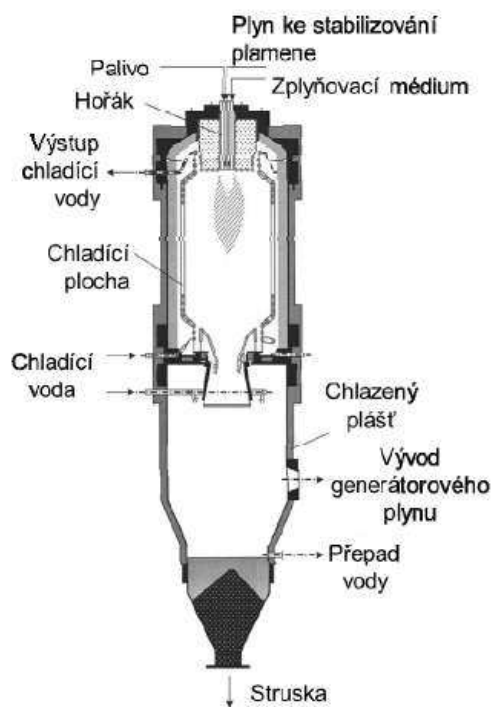
- Reaktory s fluidním ložem mají kompaktní konstrukci z důvodu vysoké výměny tepla a reakčních rychlostí v důsledku intenzivního míchání v loži.
- Teplotní profil je rozložen rovnoměrně.
- Ve fluidních reaktorech je možné zpracovat více druhů paliv než v reaktorech s pevným ložem.
- Při zpracování biomasy ve fluidních reaktorech se dosahuje relativně nízkých teplot.

Nevýhody

- Ve fluidních reaktorech vzniká velké množství dehtu ve vzniklém plynu.
- Syntézní plyn vyrobený ve fluidních reaktorech má vysokou teplotu.

5.4.3 Hořákové generátory

Zplyňovací proces probíhá v plameni za sub-stechiometrických podmínek, je při něm dosahováno teploty 1300-1600 °C a tlaků 2-7 MPa. Zplyňovacím médiem bývá směs kyslíku a páry. Doba zdržení částic biomasy v reaktoru je velmi krátká – maximálně 1 s. Při vysokých teplotách je popel v kapalném skupenství a odchází ve formě strusky. Výhodou hořákových generátorů je, že dosahují až 99% konverze paliva na plyn. Díky vysokým teplotám je vyrobený plyn vysoké čistoty, takřka bez nižších uhlovodíků a dehtu, obsahuje nad 80 obj. % vodíku a oxidu uhelnatého, proto se hořákové generátory používají pro výrobu syntézního plynu k použití v chemickém průmyslu. Nevýhodou generátorů jsou vysoké nároky na přípravu paliva, které musí být dodáváno ve formě prášku nebo suspenze. Mohou být použita i popelnatá paliva, která ale musí být upravena na částice o velikosti do 100 μm , což je u biomasy, která má vláknitou strukturu poměrně obtížné. Pokud biomasa nevyhovuje, musí se předupravit. Ligno-celulosová biomasa bývá upravena nízko-teplotní pyrolýzou (pražením resp. torefikací), středně – teplotní pyrolýzou při teplotách 400-600°C, nebo rychlou pyrolýzou. Schéma hořákového generátoru je na obrázku 4.6. [3]



Obrázek 4.6 Schéma hořákového generátoru [3]

5.2.3 Plazmové zplyňování

Plazmové zplyňování je možností, jak přeměnit všudypřítomný odpad na energii. Ve spalovací komoře se dostávají do kontaktu zpracovávané materiály s plazmou o teplotě vyšší než 1600 °C. Pomocí plazmových generátorů lze zplynit komunální tuhé odpady, odpady ze zdravotnictví, veškerou biomasu i nebezpečný odpad. Extrémní teploty zajišťují, že jsou vstupní materiály rozštěpeny na jejich základní prvky, proto je i nebezpečný odpad vynikajícím zdrojem pro tuto technologii. Anorganické materiály jsou v průběhu zplyňování roztaveny do skelné strusky, která není nebezpečná a může být použita ve střešních krytinách nebo konstrukci vozovek. Technologie plazmového zplyňování je známa už přes 30. let, kdy se využívala k likvidaci nebezpečného odpadu, a popela ze spaloven odpadu. Dnes nabývá na významu plazmové zplyňování komunálního odpadu, který je z části tvořen biomasou. Plazmové zplyňování má mnoho výhod, v plazmových reaktorech dochází k získání největší množství energie z odpadu. Vstupní suroviny mohou být jakkoliv smíšený – komunální tuhé odpady, biomasa, pneumatiky, nebezpečný odpad apod. Plazmové zplyňování snižuje potřebu skládkování odpadu a je šetrné k životnímu prostředí. Výsledný plyn může být spalován v plynové turbíně, používán k výrobě různých chemikálií, hnojiv, nebo pohonných hmot. Schéma plazmového reaktoru je zobrazeno na obrázku 4.7. [19]



Obrázek 4.7 Princip plazmového zplyňování [19]

Následující tabulka (tabulka 4.2) ukazuje vlastnosti uvedených typů generátorů (reaktorů).

Tabulka 4.2 Vlastnosti zplyňovací generátorů [3]

Typ reaktoru	Výkon [MW _t]	Výstupní teplota [°C]	Dehet [gm ⁻³]	Prach [gm ⁻³]	Požadavky na kvalitu paliva
souproudý	< 1	500 - 850	0,1 - 2	0,1 - 1	vysoké
protiproudý	0,5 - 50	70 - 300	10 - 100	0,1 - 0,5	střední
se stacionární. fluid. vrstvou	1 - 15	700 - 900	1 - 20	20 - 100	nízké
s cirkulující. fluid. vrstvou	10 - 150	750 - 950	1 - 20	5 - 50	nízké
hořákový	10 - 250	1000 - 1600	-	-	vysoké

Další tabulka konkretizuje požadavky na kvalitu paliva, které se v jednotlivých reaktorech zpracovává (tabulka 4.3)

Tabulka 4.4 požadavky na kvalitu paliva pro jednotlivé typy generátorů [3]

parametr	Typ generátoru			
	protiproudý	souproudý	fluidní	hořákový
Velikost částic [mm]	5 - 100	20 - 100	1 - 200	< 0,1
Vlhkost [hm. %]	< 15	< 5	< 40	< 15
Popel [hm. %]	< 15	< 5	< 20	< 20
Sypná hmotnost [kgm ⁻³]	> 400	> 500	> 100	> 400
Teplota taení popela [°C]	> 1000	> 1250	> 1000	< 1250

5.3 Zhodnocení zplyňování

Zplyňování vs. spalování

Zplyňování, jež je významným pokrokem oproti spalování, je technologie, při které dochází k přeměně biomasy včetně komunálního odpadu na cennější formy energie. V dnešní době se začíná přecházet od ekologicky nešetrného a celkově nevýhodného spalování odpadu k jeho zplyňování. Při spalování vzniká popel, palivo oří za přítomnosti velkého množství vzduchu, vzniká oxid uhličitý a teplo, které se využívá k výrobě páry sloužící pro výrobu tepla a elektrické energie. Oproti tomu při zplyňování vzniká syntézní plyn, který je energeticky hodnotnější a může být využit pro výše uvedené aplikace. Zplyňování je také podstatně čistějším procesem než spalování, při kterém vznikají toxické látky (hlavně spalováním plastů). Zplyňování umožňuje rozbít materiál na jeho základní složky a případné nečistoty poté relativně snadno z plynu odstranit. [28]

Ekonomické výhody zplyňování

V oblasti ekonomiky má zplyňování následující výhody:

- Může účinně konkurovat drahým energetickým komoditám za účelem výroby energie.
- Je využíváno ke zvýšení energetické hodnoty vstupních produktů, které je pak možné energeticky zpracovat.
- Umožňuje zpracovat rozličné druhy vstupních surovin.
- V oblasti zplyňování komunálních odpadů dochází ke snižování nákladů na hospodaření s ním, z komunálního odpadu se tak stává cenná komodita.
- Zplyňování částečně odpoutává společnost od závislosti na fosilních palivech (zemním plynu).
- Umožňuje používat k výrobě energie místní zdroje, místo využívání dovezených a poměrně drahých.
- Zplyňovací generátory vytvářejí relativně malé množství emisí. [29]

6. HYDROTERMÁLNÍ KRAKOVÁNÍ (ZKAPALŇOVÁNÍ)

Hydrotermální krakování, či zkapalňování, (anglická zkratka HTL) je vlastně pyrololýza probíhající ve vodě dosahující kritických parametrů. Tato technologie napodobuje podmínky vzniku fosilní ropy. Pomocí vysokých teplot a tlaku je možné urychlit procesy, které jinak trvají několik milionů let, doslova na několik minut. Jedná se o termochemický proces, při kterém se biomasa přeměňuje na kapalná paliva. Přeměna probíhá ve vodním prostředí při teplotách 250 – 374 °C a tlacích 4 až 22 MPa. Cílem je rozbit pevnou polymerickou strukturu biomasy, a tak získat kapalinu. [14]

Proces hydrotermálního zkapalňování je rozdělen do tří samostatných fází v závislosti na podmínkách, při kterých probíhají: [14]

- První fáze se nazývá **hydrotermální karbonizace** a probíhá při teplotách pod 250 °C. Hlavním produktem první fáze je materiál s podobnými vlastnostmi jako má uhlí.
- Druhá fáze, která probíhá za teplot 250 – 370 °C, je nazývána jako **hydrotermální zkapalňování** a produkuje se při ní kapalné palivo nazývané bio-ropa, která je velmi podobná fosilní ropě.
- Při teplotách vyšších než 370 °C dochází k **hydrotermálnímu zplyňování**, výsledkem je syntetický pohonný plyn.

Proces umožňuje zpracovat vlhké materiály bez předchozího vysoušení. Teplota je dostatečně vysoká pro průběh pyrolytických procesů a vysoký tlak dopomáhá k udržení kapalné fáze v reaktoru. Většinu biomasy, díky její hydrofilní povaze, lze zpracovat procesem hydrotermálního zkapalňování. [14]

Zpracování ligno-celulózové biomasy

Je-li pomocí hydrotermálního zkapalňování zpracovávána dřevní biomasa, výsledný produkt není analogický k fosilním palivům, ale jedná se o směs kyslíkatých látek a dalších molekul. Bio-ropa obsahuje kyseliny, alkoholy, ketony, fenoly methoxy-fenoly a další kondenzované struktury jako naftoly a benzofurany. Dřevní biomasu je třeba před zpracováním nejdříve nadrtit a namlít a pro vytvoření správně koncentrované kaše přidat vodu. [14]

Zpracování vlhké biomasy

Při použití velmi vlhké biomasy, jako jsou např. mořské řasy, se vstupní surovina musí naopak odvodnit na určité množství vlhkosti, které je pro zpracování optimální. Mokrá biomasa je pro proces hydrotermálního zkapalňování vhodnější, konkrétně na zkapalňování řas, které jsou slibným zdrojem alternativních paliv, je dnes zaměřeno mnoho výzkumů. Některé druhy makrořas, hnůj a čistírenské kaly jsou vhodné pro přímé zpracování. Použití HTL na zpracování čistírenských kalů a hnoje je vhodné i z toho důvodu, že se při něm sterilizují toxické látky v nich obsazené. [14]

Následující tabulka (tabulka 6.1) porovnává vlastnosti a složení jednotlivých zdrojů pro HTL.

Tabulka 6.1 Složení a vlastnost zdrojů pro HTL [14]

druh biomasy (sušina)	dřevní biomasa	makrořasy	mikrořasy	hnůj	Čistírenské kaly
popel [%]	3 – 8	15 – 35	7 - 26	10 - 20	20 - 50
H/C	1,2	1,2	1,6	1,5	1,6
O[%]	35 – 45	25 – 40	25 - 30	35 - 45	50
N [%]	0,5 – 3	3 - 7	5 - 9	3 - 6	3 - 8
výhřevnost [MJ/kg]	12 – 20	10 - 20	25 - 30	10 - 20	14
velikost částic [mm]	1 – 100	1 – 010	0,001 – 0,1	0,001 – 0,01	0,001 – 0,1
nutnost předúpravy	ANO	ne všechny druhy	NE	NE	záleží na složení

Technologie, pro hydrotermální krakování jsou stále ve fázi výzkumů, existuje několik laboratorních jednotek, ale v praxi se zatím žádné nevyužívají.

6.1 Bio-ropa



Hlavním produktem hydrotermálního zkapalňování je bio-ropa pro ilustraci na obrázku 6.1, což je vysoce viskózní kapalina s relativně vysokým obsahem dusíku a kyslíku (každá ze složek asi 5 hm. %) a s výhřevností kolem 35 MJ/kg. Optimální provozní podmínky pro co nejvyšší výtěžky jsou při teplotě 350 °C a době zdržení v reaktoru 3-14 minut. HTL biomasy je relativně dobrým způsobem, jak vyrobit kapalná paliva z biomasy. Produkty vzniklé hydrotermálním zkapalňováním se musí následně upravit, aby mohly být komerčně využívány. Je nutné, aby byla technologie co nejudržitelnější a nejvýhodnější. Výzkumy bylo zjištěno, že hmotnostní výtěžek bio-ropy 40 a 60 hm. % ze vstupní suroviny, což je relativně vysoké číslo, se získá v kontinuálních reaktorech. [14]

Obrázek 6.1 Bio-ropa [32]

V následující tabulce 6.2 jsou uvedeny hodnoty výhřevnosti bio-ropy při použití rozličných vstupních surovin.

Tabulka 6.2 Výhřevnost bio-ropy při použití různých vstupních surovin [34]

druh biomasy		Výhřevnost [MJ/kg]
Ligno-celulózová biomasa	bukové dřevo	35
	bagasa	31
	bagasa/černý louh	28
	skořápky kokosových ořechů	30
	kukuřičné stonky	30
	odpadky	36
mikrořasy	Dunaliella tertiolecta	36
	Botryococcus braunii	48
	Spirulina platensis	34
	Scenedesmus sp	30

6.1.1 Úprava bio-ropy

Sejně tak jako fosilní ropa vyžaduje bio-ropa různé úpravy, aby mohla být průmyslově a komerčně využívána.

Hydrogenace bio-ropy

Hydrogenace je proces, který se používá pro fafinaci fosilní ropy, její pomocí se zvyšuje saturace uhlovodíků, snižuje se obsah kyslíku, síry a dusíku. Hydrogenace spočívá v zabránění deaktivace katalyzátorů reakcí při dalším zpracování. Obsah kyslíku je zredukován takřka na nulovou hodnotu. Pomocí hydrogenace dostaneme z bio-ropy prakticky ekvivalent osilní ropy. [18]

- Hydrodeoxygenace (HDO) s kovovými katalyzátory

Hydrodeoxygenace se skládá z procesů hydrogenace a odstraňování kyslíku provádí se za účelem zlepšení vlastností produktu HTL a také k co největšímu přiblížení jeho vlastností k fosilním palivům. Proces HDO bio-ropy zahrnuje vysokou teplotu, vysoký tlak vodíku a použití takového katalyzátoru (např. Co nebo Mo), aby byly zajištěny správné podmínky pro proces hydrogenace. [18]

Ačkoliv je hydrotermální krakování pyrolytický proces, bio-ropa vzniklá procesem HTL se velmi liší od bio-oleje vzniklého při rychlé pyrolýze - bio-ropa má větší viskozitu a menší hustotu než bio-olej.

6.2 Zbytková voda

Pracovním médiem při HTL je velké množství vody, která je nutná k vytvoření kaše z namleté dřevní biomasy. Je důležité zbylou vodu vyčistit a recyklovat, aby byl proces co nejekologičtější. Ve zbytkové vodě se v malých koncentracích nachází stejné složky jako v bio-ropě a organické kyseliny (kyselina mravenčí, mléčná, glykolová, octová a ropinová). Opětovné použití vody je důležité pro hospodárnost celého procesu HTL, minerály je možné separovat pomocí filtrů, ale další látky v ní zůstávají, jednou z možností je čištění pomocí anerobní digestce a další tzv. katalitické hydrotermální zplyňování. To spočívá v přeměně uhlovodíkových látek na metan, který se od vody a plynného oxidu uhličitého snadno oddělí. [14]

6.3 Zhodnocení procesu HTL

Výhody procesu HTL

Výhodami hydrotermálního zkapalňování jsou především v jeho hlavním produktu a tedy v bio-ropě. Bio-ropa má vysoké hodnoty výhřevnosti, které dosahují 35 – 39 MJ/kg sušiny. Při procesu zkapalňování se spotřebuje pouze 10 – 15 % energie, která je obsažená v biomase, energetická účinnost je pak 85 – 90 %. Dalšími výhodami bio-nafty je nízký obsah kyslíku, síry a vody, ve srovnání s pyrolyzním olejem (ten obsahuje až 50 % vody), její stabilita při skladování, poměrně nízké náklady na úpravu a možnost ji upravovat ve stávajících rafinériích. Další významnou výhodou je skutečnost, že je možné upravovat i vlhkou biomasu. [11]

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce byla zaměřena na moderní termické procesy určené pro energetické zušlechťení biomasy, konkrétně na rychlou a pomalou pyrolýzu, pražení, zplyňování a hydrotermální krakování. Všechny tyto metody mají za cíl zušlechťit biologický materiál lepšími vlastnostmi, tj. především s vyšší výhřevností, skladovatelností apod. a se širšími možnostmi využití výsledných produktů.

V práci byly nejprve stručně popsány nejběžnější zdroje biomasy, jejich rozdělení a několik konkrétních příkladů. Dále možnosti jejího energetického využití i úpravy. Tuto část práce jsem co nejvíce zestručnil, protože informace v ní obsažené jsou všeobecné známé, nicméně je nutné uvést alespoň základní informace. Zbytek práce je věnován termickým metodám pro úpravu biomasy. Všechny metody jsou v zásadě založené na principu pyrolýzy, avšak jsou mezi nimi jisté odlišnosti, které dávají za vznik jiným produktům a umožňují zpracovat různé materiály. U každé metody je popsán její princip, výstupní produkty a jejich konkrétní využití. Produkty se využívají pro výrobu bio-paliv, různých chemikálií nebo se využívají přímo. U každé metody popsáno několik konkrétních technologií, které se pro zpracování biomasy využívají. Termickými úpravami uvedenými v této práci získáváme mnoho druhů alternativních paliv, která mají potenciál nahradit fosilní paliva jako uhlí, ropu (výrobky z ní) i zemní plyn. Nicméně je třeba urazit ještě dlouhou cestu k tomu, aby byla výroba bio-paliv z biomasy co nejefektivnější a tak použitelná i v průmyslovém měřítku. Z mého pohledu je nejslibnější torefakce a hydrotermální krakování, z toho důvodu, že mohou plně nahradit fosilní zdroje a rovněž poskytují možnost jisté samostatnosti jednotlivých zemí pro výrobu paliv do tepelných elektráren nebo pohonných hmot.

Bohužel se mi nepodařilo najít žádné zdroje odkazující se na konkrétní hodnoty účinnosti jednotlivých procesů. Účinnost každého procesu však závisí na vlastnostech a složení vstupní suroviny, nejčastěji se jedná o dřevní biomasu, a také podmínkách, za jakých je reaktor provozován – doba zdržení, provozní teplota apod.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] TRÁVNÍČEK, Petr. *Technologie zpracování biomasy za účelem energetického využití*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2015. ISBN 978-80-7509-206-9.
- [2] Overview of Biomass Pyrolysis Process. BioEnergy Consult - Powering Clean Energy Future [online]. Dostupné z: <http://www.bioenergyconsult.com/biomass-pyrolysis/>
- [3] POHOŘELÝ, Michael, Michal JEREMIÁŠ, Petra KAMENÍKOVÁ, Siarhei SKOBLIA, Karel SVOBODA a Miroslav PUNČOCHÁŘ. ZPLYŇOVÁNÍ BIOMASY. Chemické listy [online]. 2012, 2012(106), 264-274 [cit. 2017-05-07]. ISSN 1213-7103. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2012_04_264-274.pdf
- [4] Výroba „super-pelet“ metodou torrefakce. Tzbinfo [online]. Topinfo, ©2001-2017 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/peletky/8655-vyroba-super-pelet-metodou-torrefakce>
- [5] akela.mendelu.cz [online]. [cit. 17.04.2017]. Dostupné z: https://akela.mendelu.cz/~xcepl/inobio/inovace/Pridruzena_lesni_vyroba/Drevene_uhli_Inobio.pdf
- [6] Various Advantages and Disadvantages of Biomass Energy. Renewable & Non-Renewable Energy Sources - Conserve Energy Future [online]. Copyright © 2017 . [cit. 05.05.2017]. Dostupné z: http://www.conserve-energy-future.com/advantages_disadvantages_biomassenergy.php
- [7] Heat and Power from Pyrolysis oil - BTG Bioliquids BV. [online]. © 2017 BTG Biomass Technology Group [cit. 02.05.2017]. Dostupné z: <https://www.btg-btl.com/en/applications/heat-power>
- [8] Sustainable transport fuels from pyrolysis oil - BTG Bioliquids BV. [online]. © 2017 BTG Biomass Technology Group [cit. 02.05.2017]. Dostupné z: <https://www.btg-btl.com/en/applications/biofuel>
- [9] Fast pyrolysis - Biomass Technology Group BV. [online]. © 2017 BTG Biomass Technology Group [cit. 03.05.2017]. Dostupné z: <http://www.btgworld.com/en/rtd/technologies/fast-pyrolysis>
- [10] PEER, Václav a Pavel FRIEDEL. Zplyňování - principy a reaktory. vytapeni.tzb-info.cz © 2001-2017 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/13729-zplynovani-principy-a-reaktory>
- [11] Hydrothermal liquefaction -- the most promising path to a sustainable bio-oil production | EurekAlert! Science News. EurekAlert! Science News [online]. © 2017 by the American Association for the Advancement of Science [cit. 11.05.2017]. Dostupné z: https://www.eurekalert.org/pub_releases/2013-02/au-hl020613.php
- [12] Biofuels - Types of Biofuels - Syngas. Biofuels - Biofuel Information - Guide to Biofuels [online]. © 2010 Biofuel.org.uk [cit. 02.05.2017]. Dostupné z: http://biofuel.org.uk/sy_gas.html

- [13] Benefits of Torrefied Wood Pellets | New Biomass Holding LLC. New Biomass Energy LLC [online]. © 2017 New Biomass Holding [cit. 03.05.2017]. Dostupné z: <http://newbiomass.com/our-products/torrefied-wood/benefits-of-torrefied-wood-pellets/>
- [14] ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books. [online]. [cit. 03.05.2017]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852414013911>
- [15] Česká asociace pro pyrolýzu a zplyňování [online]. Copyright © [cit. 17.04.2017]. Dostupné z: <http://cpga.cz/files/prednasky/1401%20CEZ.pdf>
- [16] ENERGIE BIOMASY. EkoWATT [online]. © 2011 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://ekowatt.cz/cz/informace/obnovitelne-zdroje-energie/energie-biomasy>
- [17] Zplyňování biomasy – možnosti uplatnění. Biom.cz [online]. © 2010 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/zplynovani-biomasy-moznosti-uplatneni>
- [18] Energies | Free Full-Text | A Review of Hydrothermal Liquefaction Bio-Crude Properties and Prospects for Upgrading to Transportation Fuels | HTML. MDPI - Publisher of Open Access Journals [online]. 2015 by the authors [cit. 20.05.2017]. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1073/8/7/6765/html>
- [19] Plasma Gasification » GSTC. The Gasification & Syngas Technologies Council » GSTC [online]. © 2017 [cit. 20.05.2017]. Dostupné z: <http://www.gasification-syngas.org/technology/plasma-gasification>
- [20] Biomasa – využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR. OEnergetice.cz [online]. © 2017 [cit. 17.04.2017]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/obnovitelne-zdroje-energie/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-nevyhody/>
- [21] Řepka olejná: Biomasa, díky níž česká pole zežloutla | Nazeleno.cz. Úspory energie, izolace, zdravý životní styl, biopotraviny, ekologie | Nazeleno.cz [online]. © 2015 Nazeleno.cz, všechna práva vyhrazena. Člen skupiny NetBrokers Holding. ISSN 1803 [cit. 17.04.2017]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/vytapeni-1/biomasa/repka-olejna-biomasa-diky-niz-ceska-pole-zezloutla.aspx>
- [22] Pyrolýza. EnviroVid [online]. Green Energy Storage Consulting, n.o., © 2017 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.envirovid.eu/pyrolyza/>
- [23] Dřevěné uhlí až ke dveřím | Garlo.cz. Zahradnictví online | Garlo.cz [online]. Cross Orders s.r.o., © 2017 [cit. 21.05.2017]. Dostupné z: <https://garlo.cz/drevene-uhli/>
- [24] Daya Ram Nhuchhen, Prabir Basu and Bishnu Acharya (2014), International Journal of Renewable Energy & Biofuels, DOI: 10.5171/2014.506376.
- [25] Co je zplyňování a pyrolýza. Cpga [online]. [cit. 2017-05-1]. Dostupné z: <http://www.cpga.cz/#cojezplynovani>

- [26] Úvod | Rychle rostoucí topoly - Ing.Radim Luňáček - Japonské topoly - japonský topol a vše důležité kolem topolů. *Úvod | Rychle rostoucí topoly* - Ing.Radim Luňáček - *Japonské topoly - japonský topol a vše důležité kolem topolů* [online]. Dostupné z: <http://www.rychlerostoucitopoly.cz/>
- [27] Herbář Wendys - Brassica napus subsp. napus - brukev řepka olejka. *Herbář Wendys - Domů* [online]. © 2017 Herbář Wendys [cit. 21.05.2017]. Dostupné z: <http://botanika.wendys.cz/index.php/14-herbar-rostlin/741-brassica-napus-subsp-napus-brukev-repka-olejka>
- [28] Gasification vs. Incineration » GSTC. The Gasification & Syngas Technologies Council » GSTC [online]. © 2017 [cit. 21.05.2017]. Dostupné z: <http://www.gasification-syngas.org/applications/gasification-vs-incineration>
- [29] Economic Benefits of Gasification » GSTC. The Gasification & Syngas Technologies Council » GSTC [online]. © 2017 [cit. 21.05.2017]. Dostupné z: <http://www.gasification-syngas.org/applications/economic-benefits-of-gasification/>
- [30] BTG Fast pyrolysis process - Empyro - energy & materials from pyrolysis. Home - Empyro - energy & materials from pyrolysis [online]. Dostupné z: <http://www.empyroproject.eu/index.php?id=27>
- [31] Industrial Pyrolysis Tyre Oil, Pyrolysis Tyre Oil | Biaora | Pankaj Oil Industries | ID: 7371702391. IndiaMART - Indian Manufacturers Suppliers Exporters Directory,India Exporter Manufacturer [online]. [cit. 21.05.2017]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/industrial-pyrolysis-tyre-oil-7371702391.html>
- [32] Simple new process turns sewage sludge into "biocrude" oil : TreeHugger. TreeHugger | Your source for green design & living news, commentary and advice [online]. © 2017 [cit. 21.05.2017]. Dostupné z: <https://www.treehugger.com/renewable-energy/simple-new-process-turns-sewage-sludge-biocrude-oil.html>
- [33] Spolek KOLIBA - Archiv. Spolek KOLIBA - Úvod [online]. Copyright © Občanské sdružení Koliba [cit. 22.05.2017]. Dostupné z: <http://www.koliba-os.cz/news/30/59/Paleni-milire-2011.html>
- [34] Energies | Free Full-Text | A Review of Hydrothermal Liquefaction Bio-Crude Properties and Prospects for Upgrading to Transportation Fuels | HTML. MDPI - Publisher of Open Access Journals [online]. © 2015 by the authors [cit. 22.05.2017]. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1073/8/7/6765/htm>
- [35] Torrefied Wood Pellets – Solvay Biomass Energy. Solvay Biomass Energy – Serious Sustainable Energy [online]. © 2016 Solvay Biomass Energy LLC. Hosted on servers powered by renewable energy. [cit. 11.05.2017]. Dostupné z: <http://solvaybiomassenergy.com/our-products/torrefied-wood-pellets/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ, JEDNOTEK A ZKRATEK

H_v	[MJ/kg; MJ/m³]	výhřevnost
p	[Pa]	tlak
t	[°C]	teplota
C₂		oxid uhličitý
CO		oxid uhelnatý
H₂		vodík
CH₄		methan
H₂O		voda
H₂S		sulfan
CS₂		sulfid uhličitý
NH₃		amoniak
HCN		kyanovodík
HTL		hydrothermal liquefaction
HDO		hydrodeoxygenace

